



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports

UPC BARCELONATECH

TESIS DE MÁSTER

Máster

Ingeniería Estructural y de la Construcción

Título

**ESTUDIO DE MEZCLAS DE ÁRIDOS RECICLADOS DE
HORMIGÓN Y ASFÁLTICO ESTABILIZADOS CON CEMENTO
PARA SU APLICACIÓN EN BASES Y SUBBASES DE CARRETERAS**

Autor

Rafael Nathanael Muñoz Estévez

Tutores

Marilda Barra Bizinotto

Enric Vázquez Ramonich

Intensificación

Construcción

Fecha

Julio 2013

**ESTUDIO DE MEZCLAS DE ÁRIDOS RECICLADOS DE
HORMIGÓN Y ASFÁLTICOESTABILIZADOS CON CEMENTO PARA
SU APLICACIÓN EN BASES Y SUBBASES DE CARRETERAS**

Autor

RAFAEL MUÑOZ ESTÉVEZ

Tutores

MARILDA BARRA

ENRIC VÁZQUEZ

Tutor Externo

DIEGO APONTE

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA

Departamento Ingeniería de la Construcción

Barcelona, Julio 2013

DEDICATORIA

*A MIS PADRES,
RAFAEL MUÑOZ Y BONA ESTÉVEZ*

AGRADECIMIENTOS

“Dando gracias a Dios Padre en nombre de Cristo Jesús, nuestro Señor, siempre y por todas las cosas” (Efesios 5:20). Que para la construcción de su reino sean mis logros.

Al Ministerio de Educación Superior Ciencia y Tecnología de República Dominicana, por permitirme la oportunidad de una mejor preparación académica, proporcionando los medios económicos que han hecho posible este logro que también es del país.

A mis progenitores Rafael Muñoz y Bona Estévez, por siempre estar presente desde la distancia con sus preocupaciones, consejos y oraciones; me siento muy orgulloso de haberlos escogido como mis padres.

Agradezco a mis hermanas/o, sobrinos/as, cuñados/a, gracias por ser parte de mis logros que también son de ustedes. De igual forma a mis tías Elisa e Iris, ustedes forman parte de esa roca que sostiene mi fortaleza brindándome el cariño de una madre. Además, a Yasmin Batista por el ánimo y apoyo que siempre me manifestó.

A mis tutores Marilda Barra y Enric Vázquez, por haber compartido conmigo sus experiencias y conocimientos de investigadores, por la disponibilidad, paciencia, entusiasmo y el interés que mostraron desde el primer momento que les manifesté mi interés en realizar esta tesina, gracias por el estímulo y esfuerzo para cumplir con los objetivos propuestos.

Diego y Gustavo, no hay palabras que describa el apoyo incondicional recibido para que esto hoy sea una realidad asumiéndolo como si fuese de ustedes, gracias por compartir sus experiencias y conocimientos de forma desinteresada, amable y con la mejor voluntad para que este trabajo quedara bien; sin sus aportes esta tesina no sería lo mismo.

“Dos juntos caminando avanzan mejor”, gracias a Ricardo Mateo más que mi amigo un hermano que Dios puso en el camino para juntos trillar esta experiencia de superación en nuestra vida profesional.

A todos mis compañeros/as del Master, desde la A hasta la Z en especial a los de República Dominicana por la solidaridad en todo momento, hoy puedo decir que no solo me gané el máster, sino también una buena amistad cosechada en la UPC.

Son muchas las personas que han formado parte de mi vida en esta experiencia, a las que me encantaría agradecerles su amistad, consejos, apoyo, compañía y oraciones durante todo este tiempo. Algunas de estas personas están aquí, otras en mis recuerdos y en mi corazón, sin importar en donde estén quiero darles las gracias por formar parte de mí, por todo lo que me han brindado y por todas sus bendiciones.

RESUMEN

Numerosas carreteras en el mundo son reparadas, se corrige su trazado o se renuevan sus capas. Ello genera una importante cantidad de mezcla asfáltica fresada, que constituye un material que tratado adecuadamente es reciclable. La valorización de materiales reciclados en la construcción es beneficiosa tanto para el medio ambiente como para la economía. Diferentes departamentos de transporte estatales de EE. UU., así como varias administraciones europeas permiten el uso de áridos reciclados asfálticos como materiales para las capas de firme en distintos porcentajes mezclado con áridos naturales.

Con el objetivo de valorizar los áridos reciclados producidos en las obras de carreteras, este estudio evalúa la mezcla de áridos reciclados asfálticos y áridos reciclados de hormigón de baja calidad estabilizados con cemento, para ser utilizada como material granular en las capas de firmes de carretera. Así mismo se evalúa la capacidad portante de dichas mezclas sin ligante también con el propósito de utilizarlas en capas de firmes. De estos tipos de mezcla existen pocos datos.

El estudio de suelo-cemento se llevó a cabo en muestras de 100% áridos reciclados de hormigón y con mezclas de áridos reciclados de hormigón y áridos reciclados asfálticos, las cuales contienen 10%, 25% y 50% áridos reciclados asfálticos. Las muestras fueron ensayadas en el laboratorio para caracterizar el material y clasificar el uso del mismo como material granular estabilizado con cemento, según establece el artículo 513 del PG-3 vigente, también se realizaron ensayos de laboratorio para determinar las propiedades mecánicas: proctor modificado, resistencia a la compresión, módulo de elasticidad y capacidad de soporte CBR.

Los resultados obtenidos en las diferentes muestras cumplen las exigencias de la norma española para un material granular tratado con cemento SC40 y también sin cemento. Debido a que el estudio fue realizado con un árido de baja calidad, intentado tener unas condiciones adversas, el por ciento de cemento requerido para alcanzar la resistencia exigida es un tanto superior al por ciento comúnmente utilizado en los suelocemento, pero aún por debajo del máximo recomendado. Algo interesante en el estudio es que a medida que aumenta la incorporación de árido reciclado asfáltico aumenta la resistencia a compresión y disminuye la capacidad soporte CBR, a pesar de esto el menor valor de CBR obtenido en la muestra que contiene el 50% de árido reciclado asfáltico es considerado bueno y está por encima del mínimo exigido por el PG-3.

Por último, con los resultados obtenidos en las diferentes muestras se realizó un ejercicio de dimensionamiento de firme utilizando el método AASHTO-1993, los resultados fueron comparados con los exigidos por la norma española de secciones de firme, los cuales cumplen con los mínimos espesores exigidos para la sección analizada.

“Los materiales son indiferentes, pero no lo es el uso que hagamos de ellos”

(Epictetus, 55-135 a.C.)

Palabras clave: Valorización, Áridos reciclado de hormigón, Áridos reciclado asfáltico, Áridos reciclados estabilizados, Bases, Subbases, Carretera.

ABSTRACT

Many roads in the world are repaired, corrected its path or renew their layers. This generates a significant amount of milled asphalt, which is a material that is recyclable properly treated. The valuation of recycled materials in construction is beneficial both to the environment and the economy. Different state transportation departments of EE. UU., and several European administrations allow the use of recycled aggregates as materials for asphalt pavement layers in different percentages mixed with natural aggregates.

In order to value produced recycled aggregates in road works, this study evaluates the recycled aggregate mix asphalt and recycled aggregate concrete with cement stabilized low quality, to be used as granular materials in road pavement layers. It also evaluates the bearing capacity of such mixtures without binder also for the purpose of use in pavement layers. Of those kind of mixture exist little information.

Soil cement study was performed on samples of 100% recycled concrete aggregates and recycled aggregate mixes recycled aggregate concrete and asphalt, which contain 10%, 25% and 50% recycled asphalt aggregate. The samples were tested in the laboratory to characterize and classify material the use thereof as cement stabilized granular material as provided for in Article 513 of the current PG-3, also conducted laboratory tests to determine the mechanical properties modified proctor, compressive strength, modulus of elasticity and bearing capacity CBR.

The results obtained in the different samples satisfy the requirements of the Spanish standard for a granular material treated with cement-SC40 and without cement. Because the study was performed with a low-quality aggregate, have tried to adverse conditions, percent of cement required to achieve the required strength is somewhat higher than the percent commonly used in soil cement, but still below the maximum recommended. Something interesting in the study is that as you increase the incorporation of recycled dry asphalt compressive strength increases and decreases the support CBR capacity, although this is the lowest value of CBR obtained in the sample containing 50% asphalt recycled aggregate is considered good and is above the minimum required by the PG-3.

Finally, with the results obtained in the different samples was performed firm sizing exercise using the AASHTO-1993 method, the results were compared with those required by the Spanish standard of pavement sections, which meet the minimum required thickness for the analyzed section.

“The materials are indifferent, but it is not the use that we make of them”

(Epictetus, 55-135 a.C.)

Keywords: Valorization, Recycled Concrete Aggregates, Asphalt Recycled Aggregates, Recycled Aggregates Stabilized, Bases, Sub-bases, Road.

ÍNDICE

DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTOS.....	iii
RESUMEN.....	v
ABSTRACT	vii
Capítulo 1	
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Planteamiento del Problema.	1
1.2. Método de Investigación.	2
1.1.1. Descripción Revisión de la Literatura.	2
1.1.2. Programa de Investigación Experimental.	2
1.3. Estructura de la Tesis.	2
Capítulo 2	
OBJETIVOS	3
2.1. Objetivos.	3
2.2. Objetivos Específicos.	3
Capítulo 3	
ESTADO DEL CONOCIMIENTO.....	5
3.1. Árido Reciclados.	5
3.1.1. Producción de Árido Reciclado.....	6
3.1.1.1. Demolición Selectiva.	6
3.1.1.2. Plantas de Producción de Árido Reciclado de Hormigón o Mixto.....	7
3.1.1.3. Plantas Móviles de Reciclaje de RCDs.	8
3.2. Áridos Reciclados de Hormigón.	9
3.2.1. Propiedades Físicas.	10
3.2.2. Propiedades Químicas.	10
3.3. Áridos Reciclados de Asfalto.	11
3.4. Cemento Portland.	13
3.4.1. Origen del Cemento Portland.....	13
3.4.2. Proceso de Producción.	13
3.4.3. Componentes y Propiedades.	14
3.4.3.1. Propiedades Químicas:.....	15
3.4.3.2. Propiedades Físicas y Mecánicas:	16
3.4.4. Tipos de Cementos.	17
3.4.4.1. Cemento Tipo I:.....	17
3.4.4.2. Cemento Tipo II:	18
3.4.4.3. Cemento Tipo III:	18
3.4.4.4. Cemento Tipo IV:.....	18
3.4.4.5. Cemento Tipo V:	18
3.4.4.6. Cemento Tipo ESP VI:.....	18

3.5. Estructura de una Carretera.	20
3.5.1. Características Funcionales y Estructurales.	21
3.5.2. Tipos de Firmes.	21
3.5.2.1. Firmes Flexibles:	21
3.5.2.2. Firmes Rígidos:.....	23
3.5.3. Bases y Subbases.....	24
3.5.3.1. El Suelocemento:	25
3.5.3.2. La Gravacemento:.....	26
3.6. Dimensionamiento de Bases y Subbases.	27
3.6.1. Métodos Analíticos.....	27
3.6.2. Métodos Empíricos.....	27
3.6.2.1. Método AASHTO:.....	29
3.7. Uso de los ARH y ARA como Bases y Subbases de Carreteras.....	29
3.7.1. Áridos Reciclados de Hormigón (ARH).....	29
3.7.2. Áridos Reciclados Asfáltico (ARA).....	32
 Capítulo 4	
METODOLOGÍA Y ESTUDIO EXPERIMENTAL	35
4.1. Materiales Usados.....	35
4.1.1. Áridos.....	36
4.1.1.1. Granulometría.	36
4.1.1.2. Densidad y Absorción.....	37
4.1.1.3. Identificación Visual:.....	38
4.1.1.4. Sulfatos Solubles en Ácido y Azufres Totales:	39
4.1.1.5. Índice de Lajas:.....	39
4.1.1.6. Índice de Machacabilidad:	40
4.1.1.7. Composición Química (FRX):.....	40
4.1.1.8. Composición Mineralógica (DRX):	41
4.1.1.9. Contenido de Betún:	42
4.1.2. Material Conglomerante.	42
4.1.2.1. Densidad Real:.....	42
4.1.2.2. Resistencias Mecánicas:.....	42
4.1.2.3. Composición Química (FRX):.....	45
4.1.2.4. Composición Mineralógica (DRX):	45
4.1.2.5. Granulometría Laser:.....	46
4.2. Procedimientos y Fabricación.	47
4.2.1. Fabricación de las Muestras.	48
4.2.1.1. Muestras para Ensayos del Índice de C.B.R.:	49
4.2.1.2. Muestras para Ensayos a Compresión:	49
4.2.1.3. Muestras para Ensayos de Módulo de Elasticidad:.....	50
4.3. Propiedades Mecánicas Medidas.	50
4.3.1. Proctor.	51
4.3.2. Capacidad Portante C.B.R.....	52
4.3.3. Resistencia a la Rotura.	52
4.3.4. Módulo de Elasticidad.	53

Capítulo 5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN	55
5.1. Proctor.....	55
5.2. Capacidad Portante C.B.R.....	57
5.3. Dosificación y Caracterización del Material Estabilizado con Cemento.	58
5.3.1. Ajuste de la Composición Granulométrica.....	58
5.3.2. Dosificación del Conglomerante.....	60
5.3.2.1. Preparación y Curado de las Probetas:	60
5.3.2.2. Realización de los Ensayos de Resistencia a Compresión Simple a la Edad Especificada:	60
5.3.2.3. Selección del Contenido de Cemento:.....	61
5.4. Resistencia de Compresión Simple.	62
5.5. Módulo de Elasticidad.....	63
5.6. Correlaciones entre Características Mecánicas y Otras Propiedades.	65
5.6.1. Relación entre el Contenido de Humedad y la Composición de la Mezclas Estudiadas.	65
5.6.2. Relación entre la Densidad Proctor y la Composición de la Mezclas Estudiadas.	65
5.6.3. Relación entre la Resistencia a la Compresión y Densidad Proctor.....	66
5.6.4. Relación entre el Módulo de Elasticidad y Densidad Proctor.	67
5.7. Dimensionamiento de Firme Utilizando el Método AASHTO-1993.....	67
CONCLUSIONES	69
FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	71
REFERENCIAS	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Propuesta de categorías abarcadas en las prescripciones técnicas. Fuente: [37].	6
Tabla 3.2: Estudios realizados en diferentes estados de EE.UU. Fuente: [28].	12
Tabla 3.3: Compuestos del cemento Portland. Fuente: [9].	15
Tabla 3.4: Límites de composición aproximado en óxidos del cemento Portland. Fuente: [10].	16
Tabla 3.5: Proporciones de los compuestos del cemento Portland. Fuente: [6].	16
Tabla 3.6: Tipos de cementos españoles. Fuente: [5].	19
Tabla 4.1: Ensayos de caracterización realizados.	35
Tabla 4.2: Granulometría del árido reciclado de hormigón y árido reciclado asfáltico.	37
Tabla 4.3: Densidad del árido reciclado de hormigón y asfáltico grueso (4 a 31.50 mm).	38
Tabla 4.4: Densidad del árido reciclado de hormigón y asfáltico fino (0.063 a 4 mm).	38
Tabla 4.5: Absorción y porosidad del árido reciclado de hormigón y asfáltico.	38
Tabla 4.6: Resultados sulfatos y azufre totales de los áridos y exigido por el PG-3.	39
Tabla 4.7: Resultados índice de lajas de los áridos y exigido por el PG-3.	40
Tabla 4.8: Resultados de machacabilidad de los áridos y exigido por la norma.	40
Tabla 4.9: Composición química del árido reciclado de hormigón y asfáltico.	41
Tabla 4.10: Composición química del cemento.	45
Tabla 4.11: Diferentes tipos de muestras.	47
Tabla 4.12: Distribución de probetas por muestras realizadas.	47
Tabla 4.13: Mezclas de áridos para las muestras por ensayo.	48
Tabla 5.1: Resultados del ensayo proctor en cada muestra.	56
Tabla 5.2: Resultados del ensayo C.B.R.	57
Tabla 5.3: Valores granulométrico del ARH y ARA, y exigido para un SC40 según PG-3 [14].	58
Tabla 5.4: Resultados ensayo a compresión con probetas 102 mm diámetro y 122.40 mm de altura.	61
Tabla 5.5: Dosificación preliminar con probetas 152.40 mm diámetro y 177.80 mm de altura.	62
Tabla 5.6: Resultados del ensayo a compresión.	63
Tabla 5.7: Resultados del ensayo de módulo de elasticidad.	64
Tabla 5.8: Requisitos de diseño para el dimensionamiento por el método AASTHTO-93.	68
Tabla 5.9: Requisitos de diseño para el dimensionamiento por el método AASTHTO-93.	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1: Proceso de demolición selectiva. Fuente: [46].....	7
Figura 3.2: Planta móvil de reciclaje de RCDs. Fuente [3].....	9
Figura 3.3: Proceso de fresado del pavimento. Fuente: Fresado zona colonial, Sto. Dgo. R.D. 2013.	11
Figura 3.4: Proceso de producción del cemento. Fuente: [38].	14
Figura 3.5: Transmisión de la carga de una rueda a través del firme. Fuente: [1].	20
Figura 3.6: Firme flexible. Fuente: [36].	22
Figura 3.7: Firmes semirrígido: (A) con base de suelocemento; (B) con base de gravacemento; (C) inverso. Fuente: [12].....	23
Figura 3.8: Firme rígido. Fuente: [36].....	24
Figura 4.1: Árido reciclado de hormigón y árido reciclado asfáltico.	36
Figura 4.2: Curva granulométrica del árido reciclado de hormigón y árido reciclado asfáltico.	37
Figura 4.3: Identificación visual del árido reciclado de hormigón y árido reciclado asfáltico.....	39
Figura 4.4: Composición mineralógica del árido reciclado de hormigón.....	41
Figura 4.5: Composición mineralógica del árido reciclado asfáltico.....	42
Figura 4.6: Ensayo a flexión del cemento.....	43
Figura 4.7: Resistencia a flexión del cemento.....	43
Figura 4.8: Ensayo a compresión del cemento.	44
Figura 4.9: Resistencia a compresión del cemento.....	44
Figura 4.10: Composición mineralógica del cemento sin hidratar.	45
Figura 4.11: Composición mineralógica del cemento hidratado a 7 días.....	46
Figura 4.12: Composición mineralógica del cemento hidratado a 28 días.....	46
Figura 4.13: Granulometría laser del cemento.	47
Figura 4.14: Cuarteo de áridos reciclado para preparación de las muestras.	48
Figura 4.15: Cuarteo de áridos reciclado.....	48
Figura 4.16: Mezcla de los áridos reciclado.	49
Figura 4.17: Probetas CBR sumergidas durante 4 días.	49
Figura 4.18: Curado de probetas en cámara húmeda.....	50
Figura 4.19: Compactación de probeta en ensayo proctor.....	51
Figura 4.20: Probeta en ensayo de CBR.....	52

Figura 4.21: Esquema de diferentes ensayos para caracterizar la resistencia a rotura. Fuente: [12].	52
Figura 4.22: Probeta en ensayo a compresión.....	53
Figura 4.23: Probetas en ensayo de módulo de elasticidad.	54
Figura 5.1: Curvas proctor de cada una de las muestras.....	56
Figura 5.2: Estructuras de las muestras en el ensayo proctor.	56
Figura 5.3: Ensayo de capacidad portante CBR.....	57
Figura 5.4: Curvas granulométrica del ARH y ARA, y exigida para un SC40 según PG-3 [14].	59
Figura 5.5: Curvas granulométrica de las muestras de ARH y ARA, y exigida para un SC40 según PG-3 [14].	59
Figura 5.6: Detalle del molde para las probetas establecidas en el PG-3 [14].	61
Figura 5.7: Determinación del contenido óptimo de cemento para un suelocemento.	62
Figura 5.8: Ensayo a compresión de un suelocemento.....	63
Figura 5.9: Ensayo de módulo de elasticidad de un suelocemento.....	64
Figura 5.10: Relación contenido de humedad - diferentes muestras.	65
Figura 5.11: Relación densidad proctor - las diferentes muestras.	66
Figura 5.12: Relación resistencia a la compresión – densidad proctor.	66
Figura 5.13: Relación módulo de elasticidad – densidad proctor.....	67

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del Problema.

El término de sostenibilidad es un concepto en continua evolución. En los últimos tiempos se ha encaminado hacia la práctica de la construcción con la utilización de los áridos reciclados (AR), esto debido a que el ser humano siente un futuro más amenazado. Las grandes cantidades de áridos naturales (AN) que se consumen anualmente en el mundo han encaminado a preocupaciones ambientales como el agotamiento de estos, así como también el factor económico donde el costo de los AN puede ser más alto que el de los AR.

Según el GERD [42] en España, a pesar que en los últimos años ha bajado la producción, se generan más de 20 millones ton/año de residuos de construcción y demolición (RCD). Estos residuos de la construcción que se producen cada año, se hace más difícil encontrar lugares adecuados para vertederos. Los materiales reciclados ofrecen soluciones viables para la preocupación, debido a que son beneficiosos tanto para el medio ambiente como a la economía.

Los más de 500 mil kilómetros de carreteras pavimentadas que tiene España, indican que la construcción y mantenimiento constante de las mismas resulta por varios millones de euros cada año a la industria. En su gran mayoría estas carreteras son de pavimento asfáltico, los cuales periódicamente deben estar sometidos a un proceso de fresado en algunos tramos o en la totalidad del firme, para luego ser sustituido. Este proceso da origen a otro tipo de AR como es el árido reciclado asfáltico (ARA), el cual es utilizado directamente como un componente de la nueva mezcla en caliente de hormigón asfáltico, sin embargo, está limitado al 10% o menos del nuevo material. Por lo que el ARA restante está disponible para otros usos, ya que se encuentra con grandes cantidades de residuos de la construcción que se producen cada año, haciendo más difícil encontrar lugares adecuados para vertederos.

El uso de AR se ha convertido en una solución interesante en movimiento de tierras y construcción de firmes de carreteras, esto debido a los altos costes que implica la construcción o reparación de un firme, tanto en los materiales como en el transporte, así como en el impacto ambiental del proyecto. Según el autor MARSHALL BLEAKLEY [23], si el ARA puede ser utilizado in situ por una porción de los áridos de las capas granulares, reduciría significativamente estos impactos.

FOYE [24], establece que el uso de ARA en lugar de AN de piedra triturada se está convirtiendo en una práctica ampliamente aceptada para un número de aplicaciones en la construcción, en especial capas de base del firme. También, afirma que el Departamento de Transporte de Minnesota (Mn/DOT) permite la inclusión de ARA como lo establece el departamento en las especificaciones de transporte. *El uso de ARA en esta solicitud es atractiva para un número de razones: Primero, se reduce el costo de producción de la materia mediante la eliminación de la explotación de canteras, trituración, y las operaciones de detección. En segundo lugar, los proyectos de repavimentación reducen los costes de administración y transporte, debido a que el ARA se encuentra en el lugar para su reutilización. En tercer lugar, se reduce el consumo de recursos naturales y energía, así como se refleja en la reducción de los costes en los dos primeros puntos.*

McGARRAH [28], realizó una encuesta entre diferentes Departamento de Transporte en relación con el uso de ARA como material granular de capas de firmes. Los resultados indicaron que el porcentaje de ARA permitido por los organismos viales a utilizar como material granular de capa de firmes varió de 2 a 60 por ciento. Un mayor porcentaje de ARA en la capa de base puede ofrecer beneficios económicos y medioambientales. Sin embargo, cuanto más ARA se incorpora en el material granular de las capas de firme, se presentan preocupaciones de los organismos, tales como el impacto del alto porcentaje de ARA en el diseño del firme, los requisitos de compactación apropiada y características de drenaje.

Una aplicación con éxito de alto porcentaje de ARA mezclado con árido reciclado de hormigón (ARH), podría contribuir a la sostenibilidad, en términos de costos, energía y emisiones de gases de efecto invernadero.

1.2. Método de Investigación.

1.1.1. Descripción Revisión de la Literatura.

La investigación bibliográfica se centró en estudios realizados con AR, los cuales eran aplicados como material granular en capas de firme y estabilizados con cemento, en especial los ARH y ARA que son los materiales reciclados que analizamos en este estudio experimental.

En esta tesis se presenta una sinopsis completa de la literatura revisada. La cual se fundamentó en siete áreas: 1) áridos reciclados, 2) áridos reciclados de hormigón, 3) áridos reciclados asfáltico, 4) Cemento Portland, 5) estructura de una carretera, 6) dimensionamiento de bases y subbases, y 7) uso de los ARH y ARA como bases y subbases de carreteras.

1.1.2. Programa de Investigación Experimental.

Se escogieron varias categorías de ensayos para realizar en el laboratorio: 1) ensayos de caracterización para describir el material, 2) ensayos de las propiedades mecánicas: proctor, resistencia a la compresión, módulo de elasticidad y capacidad de soporte CBR; para determinar la capacidad de carga de los materiales. Las pruebas de laboratorio se llevaron a cabo en muestras de 100% ARH y con mezclas de ARH/ARA, las cuales contiene 10%, 25% y 50% de ARA. Las muestras se ensayaron con el cemento Portland como agente estabilizador.

1.3. Estructura de la Tesis.

En el capítulo 2 de esta tesis se presentan los objetivos trazados para realizar el estudio experimental, en él se pueden observar los objetivos generales así como los específicos y una descripción de lo que se pretende conseguir con cada uno de dichos objetivos.

El capítulo 3 ostenta una revisión detallada de la literatura, la cual está basada en estudios realizados referentes a los AR empleados en esta tesis, así como también en el funcionamiento y comportamiento de las capas de un firme de carreteras, en especial de las bases y subbases.

La metodología de la campaña experimental implementada en el estudio y los resultados obtenidos mediante los ensayos de laboratorio, tanto de caracterización como de propiedades mecánicas medidas se muestran detalladamente en los capítulos 4 y 5 respectivamente.

El capítulo 6 muestra las conclusiones obtenidas en el estudio y por último el capítulo 7 presenta futuras líneas de investigación para realizar basados en los resultados obtenidos.

Capítulo 2

OBJETIVOS

2.1. Objetivos.

El objetivo principal es estudiar la posibilidad de utilizar mezclas de árido reciclado de hormigón de baja calidad, como en el límite puede encontrarse en una obra y árido reciclado asfáltico, estabilizadas con cemento, para ser aplicadas en capas de base y subbase en carreteras.

Como segundo objetivo estudiamos la posibilidad de utilizar las mezclas de ese árido reciclado de hormigón y árido reciclado asfáltico, para su aplicación como capas de pavimento no ligadas.

2.2. Objetivos Específicos.

1. Determinar las características físicas, químicas y mineralógicas del árido reciclado de hormigón, el árido reciclado asfáltico y el cemento.
2. Determinar la humedad óptima y la densidad seca máxima de cada una de las mezclas de árido reciclado de hormigón con árido reciclado asfáltico por medio del ensayo Proctor Modificado, para poder ser aplicadas en la compactación en obra y en el diseño de la mezcla para material tratado con cemento.
3. Determinar la capacidad portante de las distintas mezclas sin cemento por medio del ensayo CBR, para comprobar la posibilidad de su empleo sin cemento en capas de pavimento no ligadas y comprobar las proporciones utilizables de cada uno de los áridos citados.
4. Definir el contenido óptimo de cemento de cada una de las mezclas de ARH con ARA y definir una mezcla de composición válida para su aplicación.
5. Estudiar el comportamiento mecánico (Proctor, Resistencia a Compresión y Módulo de Elasticidad) de las mezclas de ARH ARA, estabilizado con cemento CEM II/B-L 32,5N.
6. Valorar la influencia en la incorporación del árido reciclado asfáltico en las propiedades mecánicas de las mezclas y su aplicación como base y subbase en carreteras.

Con el **primer objetivo específico**, se busca conocer las propiedades de los áridos reciclados y el conglomerante utilizado para la estabilización, con la finalidad de poder establecer parámetros de aplicación para bases y subbases de carreteras. Los resultados de la caracterización se compararán con los establecidos en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3).

Uno de los aspectos fundamentales del presente trabajo se trata en el **segundo objetivo**, el cual es la determinación de la humedad óptima que da como resultado una densidad seca máxima de las mezclas a través del ensayo Proctor Modificado; pues se trata de materiales alternativos, con los cuales se han realizados pocos estudios experimentales.

El **tercer objetivo** específico **consiste en determinar la capacidad portante de las mezclas sin cemento por medio del ensayo CBR** para comprobar la posibilidad de su empleo sin cemento en capas de pavimento no ligadas y comprobar las proporciones utilizables de cada uno de los áridos citados.

El **cuarto objetivo específico** persigue obtener en las diferentes mezclas de áridos reciclados de hormigón con árido reciclado asfáltico la cantidad de cemento óptimo, para alcanzar la resistencia a compresión simple que exige el artículo 513 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3).

El **quinto objetivo** específico pretende, luego de conocer la humedad óptima y el contenido de cemento para cada una de las mezclas de áridos reciclados de hormigón y las diferentes incorporaciones de árido reciclado asfáltico, determinar el comportamiento mecánico de estos áridos reciclados estabilizados con cemento, de forma que puedan formar parte de los firmes de carreteras.

Para finalizar, con el **sexto objetivo** se pretende evaluar la influencia en la incorporación del árido reciclado asfáltico en las propiedades mecánicas para su utilización como base y subbase de carretera. Dicha evaluación se llevará a cabo mediante el cumplimiento de las exigencias requeridas en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3).

Capítulo 3

ESTADO DEL CONOCIMIENTO

El presente capítulo recoge conocimientos que se han obtenido previamente referentes al estudio experimental que se realizará en esta investigación. Se presenta un resumen de publicaciones que hablan sobre los áridos reciclados procedentes de RCD, de una forma especial del Árido Reciclado de Hormigón (ARH) y el Árido Reciclado Asfáltico (ARA), y el cemento Portland que es el conglomerante utilizado en este estudio; también, la estructura de una carretera, el dimensionamiento de las bases y subbases y por último investigaciones y experiencias realizadas con el ARH y ARA aplicado a las bases y subbases de carreteras.

3.1. Árido Reciclados.

Los residuos de construcción y demolición (RCD), tal y como su nombre indica, provienen de la construcción y demolición de edificios e infraestructuras; rehabilitación y restauración de edificios y estructuras existentes, entre ellos carreteras; construcción de nuevos edificios y estructuras. Son de naturaleza fundamentalmente inerte [2]. En nuestro trabajo se considera especialmente el caso de ARH Y ARA procedentes de la misma obra. Obtenidos y procesados in situ, ya que este caso es el más sostenible, puesto que elimina el transporte. Ello redundaría en un ahorro económico, pero sobre todo en un ahorro de emisiones de CO₂ relacionadas con el transporte. La elección de un ARH de baja calidad se efectúa aprovechando como materia prima los ARH de elementos auxiliares de la carretera a renovar o mejorar el trazado. En cualquier caso el proceso podrá extenderse al caso de utilizar un ARH procesado en central, que representará costes económicos y ambientales algo mayores, aunque probablemente aun sostenibles, según el caso.

La mayor parte de estos residuos suelen llevarse a vertederos, creando de esta forma un gran impacto ambiental negativo, además de un visual y paisajístico al rechazar materias primas que con un adecuado tratamiento, podrían ser recicladas. Se hace por lo tanto necesaria su correcta gestión, de forma que se consiga reducir las cantidades generadas y aprovechar el potencial que tienen estos materiales para sustituir adecuadamente a los AN o artificiales.

Para lograr un material reciclado con calidad, existe una normativa que motiva la selección y separación en origen de los RCD, mediante una demolición selectiva que permita mejorar la valorización de los residuos que resulten [2]. También es necesario desarrollar e implementar técnicas adecuadas de procesamiento de los residuos con las que se puedan obtener materiales reciclados de calidad necesaria.

El AR, es aquel que se obtiene mediante el procesamiento de los RCD; las normas europeas armonizadas establecidas por el Comité Europeo de Normalización (CEN) los definen, de modo específico, como **“Los áridos resultantes del tratamiento de material inorgánico previamente utilizado en la construcción”**. Según la naturaleza de los residuos de origen, los AR se pueden clasificar en Áridos Reciclados de Hormigón (ARH), Áridos Reciclados Cerámicos (ARC), Áridos Reciclados de Asfalto (ARA), Áridos Reciclados Mixtos (ARM), Áridos Reciclados Mixtos de Hormigón (ARMH) y Áridos Reciclados Mixtos Cerámicos (ARMC). En la *Tabla 3.1* se muestra el porcentaje que debe tener un AR para saber a qué categoría pertenece.

Tabla 3.1: Propuesta de categorías abarcadas en las prescripciones técnicas. Fuente: [37].

NOMENCLATURA	NOMBRE	Características de Elementos (% del peso total)				
		Hormigón (H)	Piedra (P)	Cerámico (C)	Asfalto (A)	Otros (X)
ARH	Árido Reciclado de Hormigón	> 90%		< 10%	< 5%	< 1%
ARC	Árido Reciclado Cerámicos	< 30%		> 70%	< 5%	< 1%
ARA	Árido Reciclado de Asfalto	< 30%		< 5%	> 70%	< 1%
ARMh	Árido Reciclado Mixto de Hormigón	> 70%		< 30%	< 5%	≤ 1%
ARMc	Árido Reciclado Mixto Cerámico	< 70%		> 30%	< 5%	< 1%
ARMa	Árido Reciclado Mixto con Asfalto	-		-	> 5% < 30%	< 1%

La utilización de AR es cada vez más habitual en el campo de la construcción, en ámbitos muy variados como son la construcción de movimientos de tierras, carreteras, o su utilización en la fabricación de hormigón.

3.1.1. Producción de Árido Reciclado.

3.1.1.1. Demolición Selectiva.

Cuando los escombros de demolición proceden de grandes obras de ingeniería civil, como puentes, pavimentos, cunetas y otras estructuras, el material que se obtiene suele contener una reducida cantidad de impurezas y puede obtenerse un ARH relativamente limpio sin grandes problemas in situ.

Cuando los residuos proceden de estructuras de edificación, será necesaria para el reciclaje una separación cuidadosa de los materiales generados durante la demolición. Esto se hace para prevenir la mezcla de materiales y la contaminación de otras materias reciclables como la madera, el papel, el cartón, el plástico, etc., esto se conoce como demolición selectiva.

Teniendo en cuenta que una correcta demolición selectiva facilita la selección en la planta de reciclaje, también se pueden reducir los costes de transporte y eliminar las tasas de vertido. Por lo tanto, es necesario planificar y dirigir los trabajos de demolición de una manera completamente diferente a los métodos tradicionales.

La demolición selectiva se realiza de manera contraria al proceso de construcción, como se muestra en la *Figura 3.1* y es llamado desconstrucción, que no es más que el conjunto de acciones de desmantelamiento de una construcción que hacen posible un alto nivel de recuperación y aprovechamiento de los materiales, con la finalidad de reincorporarlos a nuevas construcciones.

Esta actividad implica los siguientes pasos [2]:

1. Sacar los desechos y las molduras no fijas.
2. Desmantelar los elementos no fijos como puertas, ventanas, tejados, instalaciones de agua, electricidad y calefacción, etc.
3. Demolición de la estructura.



a) Demolición Manual



b) Demolición Mecánica

Fig. 3.1: Proceso de demolición selectiva. Fuente: [46].

El desmantelamiento de los elementos no fijos se realiza primeramente a mano como muestra la *Figura 3.1 a*, mientras que la demolición de la construcción se lleva cabo con técnicas y métodos apropiados (martillos, voladura, etc.) según se observa en la *Figura 3.1 b*. Después de la demolición y separación, los materiales pueden trasladarse a sitios temporales de almacenamiento o ser transportados a plantas de reciclaje, donde son clasificados y triturados.

Por ultimo podemos decir que la demolición selectiva favorece el conocimiento del futuro AR, permite una preselección según la calidad del hormigón a demoler y, en definitiva, favorece la uniformidad de la calidad [3].

3.1.1.2. Plantas de Producción de Árido Reciclado de Hormigón o Mixto.

Las plantas de producción de AR incluyen machacadoras, cribas, mecanismos transportadores y equipos para la eliminación de contaminantes. Pueden habilitarse vertederos temporales de residuos y pequeñas plantas móviles que pueden emplearse para un tratamiento primario de los residuos.

Los sistemas de procesamiento utilizados dependerán de la aplicación final que se le vaya a dar al material reciclado y de la cantidad de impurezas que contenga.

Las plantas se pueden clasificar en [2]:

1. *Plantas de 1ª generación:* carecen de mecanismos de eliminación de contaminantes, a excepción del acero y otros elementos mecánicos.

2. *Plantas de 2ª generación:* añade al tipo anterior sistemas mecánicos o manuales de eliminación de contaminantes previo al machaqueo, por vía seca o húmeda. Son las más extendidas en el reciclaje de hormigón.
3. *Plantas de 3ª generación:* dirigidas a una reutilización prácticamente integral de otros materiales secundarios, considerados como contaminantes de los áridos generados.

Además, se puede realizar otra clasificación de las plantas según su capacidad de desplazamiento en: móviles, semimóviles y fijas.

✓ Plantas Móviles:

Utilizan un remolque de lecho plano como plataforma para el equipo de pre cribado, trituración, separación magnética y cribado final, junto con transportadoras, conductos y controles. En este trabajo se considera especialmente este tipo de plantas.

✓ Plantas Semimóviles:

Aunque también se entregan con camiones, son más grandes que las unidades móviles; se puede tardar hasta tres días en montarlas para su operación en un lugar determinado.

✓ Plantas Fijas:

Se montan de una forma permanente y proporcionan la mayor gama de capacidad. Estas plantas son en líneas generales, similares a las empleadas en AN, si bien incorporan de forma específica elementos para la separación de impurezas y otros contaminantes. Generalmente incluyen varios procesos de trituración y pueden procesar entre 300 y 400 toneladas por hora.

La primera etapa del procesamiento suele ser una trituración de los escombros con el fin de poder separar mediante una cinta magnética las armaduras y otros elementos metálicos que incorporen.

3.1.1.3. Plantas Móviles de Reciclaje de RCDs.

Este sistema que permite agilizar el tratamiento de los RCD en el lugar de las obras, aportando de esta forma a una gestión sostenible debido a que elimina el impacto ambiental derivado del transporte de los residuos. Estos equipos cumplen normativas acústicas y atmosféricas que los hacen aptos para trabajar en núcleos urbanos. Los productos obtenidos, con una cantidad y pureza controladas por laboratorio, son aplicables en obras de carreteras tales como: mejora de explanadas o drenajes, entre otras obras.

La tecnología en este tipo de plantas ha experimentado grandes cambios desde sus inicios. En ocasiones son utilizadas como auxiliares en las plantas fijas o como alternativa de las mismas. En la actualidad llegan a procesar hasta 400 t/hora. Algunas trabajan como plantas de proceso completo triturando el material de alimentación en una trituradora de impactos. Luego de la trituración, se criba el material en la criba inclinada que se coloca y desde allí el material sobredimensionado retorna a la trituradora mediante una cinta transportadora. Los modelos más desarrollados se utilizan en procesos abiertos para producir un único producto final [51].

La *Figura 3.2* muestra una planta móvil de reciclaje, estas plantas tienen un método de trituración y clasificación muy similar al de las plantas fijas, en Holanda cerca del 40% de los RCD son producidos con plantas móviles [50].

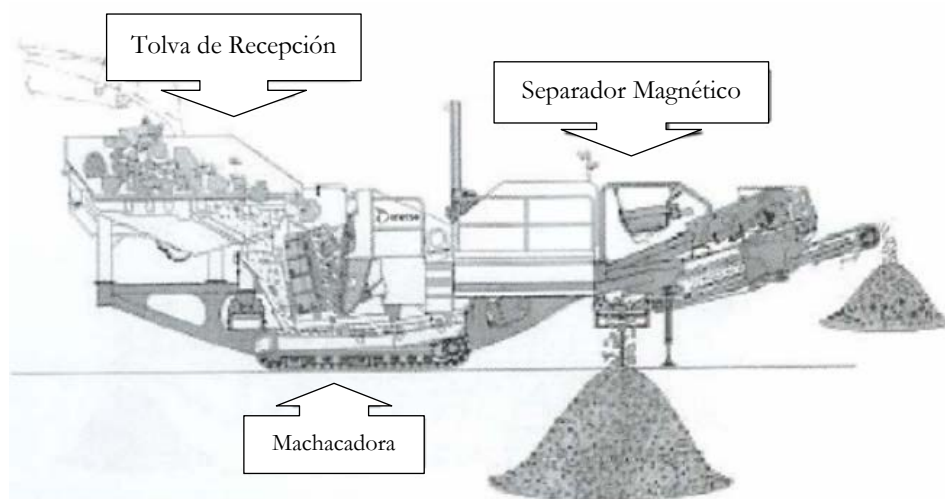


Fig. 3.2: Planta móvil de reciclaje de RCDs. Fuente [3]

Según HENDRIKS et al. [50], las ventajas y formas de cómo realizar el proceso limpieza mediante el uso de estas plantas se detallan a continuación:

En este tipo de plantas se distinguen por que presenta unas ventajas de diferentes tipos de niveles: global, local y social.

Nivel Global: toma más en cuenta el aspecto medioambiental y selectivo. Previo a la demolición el material es inspeccionado y separado, esta forma garantiza una buena calidad de los áridos después de ser puesta en marcha el proceso de la planta. La demolición y reciclaje se realizan en el mismo lugar, esto significa un ahorro de transporte lo cual es considerado como una ventaja desde el punto de vista económico y medio ambiental (reducción de emisión de CO₂ y uso de energía).

Nivel Local: solo ocupan un determinado espacio de forma temporal, este factor es de gran importancia para lugares con poco espacio disponible. Con este modelo de reciclaje se pueden tomar medidas de evitar ruidos, polvos y vibraciones que puedan provocar daños a estructuras próximas al lugar. También, se puede evitar la contaminación de los suelos y las aguas subterráneas. Finalmente no se hace necesario almacenar los áridos, debido a que son empleados rápidamente en la nueva obra.

Nivel Social: se puede destacar que el material demolido es mejor aprovechado, lo que se traduce en menor desperdicio. También, preserva los materiales en buen estado en la estructuras original y hace uso de los que no están en buenas condiciones.

3.2. Áridos Reciclados de Hormigón.

Como se muestra anteriormente en la *Tabla 3.1*, los ARH son los que presentan más de un 90% de hormigón y piedra en su composición. Estos áridos presentan una gran heterogeneidad en sus propiedades, debida principalmente a las distintas características de los hormigones que llegan a la planta de reciclado, a los sistemas de trituración empleados y a la presencia de impurezas.

En general, la calidad del ARH está claramente influenciada por la fracción considerada, presentando las fracciones finas unas peores propiedades (disminución de la densidad, aumento de la absorción, impurezas, terrones de arcilla, así como mayor contenido de cloruros y sulfatos).

Los ARH son los más estudiados y los que presentan un mayor número de aplicaciones [15].

3.2.1. Propiedades Físicas.

Luego del proceso de trituración, se obtiene un producto reciclado del hormigón original, el cual es una mezcla de áridos grueso (≥ 4 mm) y fino (< 4 mm). El árido grueso que se obtiene varía del 70% al 90% de la masa total del hormigón original. La fracción gruesa posee una granulometría adecuada para casi todas las aplicaciones de material granular en construcciones, incluyendo la producción de un nuevo hormigón.

El ARH tiene un coeficiente de forma muy similar al del árido natural, a pesar de que suele presentar un porcentaje de lajas menor. Su textura suele ser rugosa y porosa, debido a la presencia del mortero que queda adherido a los áridos del hormigón viejo.

Por otra parte, la densidad es un poco menor que la del árido natural, alrededor de un 5-10%, pero muy similar a la del hormigón convencional. Los valores más comunes van entre 2.07-2.65 kg/dm³ para la densidad real y entre 2.10-2.64 kg/dm³ para la densidad saturada con superficie seca. Para el caso de las arenas recicladas, el valor de su densidad es inferior a la de las gravas, por su mayor contenido de mortero estando la densidad real por debajo de 2.30 kg/dm³ y de 2.50 kg/dm³ la densidad saturada [33].

El ensayo de Los Ángeles en gravas recicladas presenta un desgaste entre 25-45%, mayor que el que suele encontrarse en gravas convencionales. Por el contrario, ensayos de friabilidad realizados sobre arenas recicladas dan resultados que van entre 17 y 34%, que también se suelen encontrar en las arenas convencionales [33].

Los ARH se caracterizan por tener una absorción mayor que los áridos artificiales y mucho más elevada que los naturales, esto depende de la composición del hormigón original, situándose los valores entre 4-10%. Para las arenas recicladas se obtienen resultados superiores, esto se debe a la alta absorción del mortero adherido que acumula la arena, los valores suelen situarse entre el 5 y el 15%.

Las peores propiedades que presenta el AR es debido a la presencia del mortero adherido al árido natural, el porcentaje varía entre 25-60%. Algunos estudios experimentales han demostrado que el contenido de mortero está directamente relacionado con otras propiedades como la densidad, la absorción y el coeficiente de Los Ángeles. Como las fracciones más finas tienen mayor contenido de mortero, éstas suelen presentar una peor calidad.

3.2.2. Propiedades Químicas.

Los ARH tienen características química similares a la del residuo de su procedencia. Algunos de los componentes de hidratación del cemento quedan adheridos a las partículas, y se acumulan fundamentalmente en el caso de las más finas.

El contenido de álcalis en el AR por lo general es más elevado que el del árido convencional, esto se debe a los que aporta la pasta de cemento que está adherida al árido convencional.

La gran variedad de AR y la incorporación de algunas impurezas, puede ser responsable de emisiones al suelo y a las aguas por lixiviados, especialmente cuando el árido es utilizado en diferentes aplicaciones al hormigón, como rellenos o carreteras; y cuando proceden de residuos de edificación, donde se encuentran mayor concentración de impurezas. Sin embargo, en general los ensayos consultados de lixiviación sobre AR, suelen dar resultados favorables, satisfaciendo las normativas de calidad ambiental.

3.3. Áridos Reciclados de Asfalto.

Como vimos anteriormente en la *Tabla 3.1*, los ARA son los que presentan más de un 70% de asfalto en su composición.

El proceso de reciclado del asfalto como se muestra en la *Figura 3.3*, consiste en retirar el asfalto antiguo o bases granulares de las carreteras con la técnica del fresado, dejando la superficie a reparar nivelada y uniforme a la profundidad requerida, que puede llegar hasta 25 cm por cada pasada o ciclo de recorrido.



Fig. 3.3: Proceso de fresado del pavimento. Fuente: Fresado zona colonial, Sto. Dgo. R.D. 2013.

Este tipo de AR, presenta al igual que el procedente de hormigón, un núcleo formado por el árido natural de origen, recubierto por una matriz de asfalto, resistente al desgaste y a la abrasión. Estas características se traducen en la obtención de áridos con un porcentaje de desclasificados inferiores muy reducido y unos valores del coeficiente de Los Ángeles bajos, ya que no se generan finos por rozamiento del árido en las cribas o en el transporte por las cintas, a diferencia que en el AR procedente de hormigón. Los áridos de asfalto presentan propiedades muy similares a los de hormigón, pero con una absorción de agua menor y una densidad máxima de compactación mayor.

El PG-3 [14], permite que sea utilizado como máximo el 10% de materiales procedente del fresado de mezclas bituminosas en caliente para ser incorporadas en nuevas mezclas bituminosas en caliente. Cabe destacar que el mismo permite el uso de ARA como material granular tratado con cemento en firme de carreteras, siempre y cuando cumplan con las prescripciones técnicas exigidas. En su artículo 513 establece lo siguiente:

El material granular que se vaya a utilizar en el suelocemento será una zahorra, natural u obtenida por trituración, o un suelo granular. También se podrán utilizar subproductos o

productos inertes de desecho, en cumplimiento del Acuerdo de Consejo de Ministros de 1 de junio de 2001 por el que se aprueba el Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2001-2006, en cuyo caso sus características y las condiciones para su utilización deberán venir fijadas por el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares. El material granular estará exento de terrones de arcilla, materia vegetal, marga u otras materias extrañas que puedan afectar a la durabilidad de la capa.

En la gravacemiento se utilizará un árido natural procedente de la trituración de piedra de cantera o de gravera. También se podrán utilizar productos inertes de desecho o subproductos, en cumplimiento del Acuerdo de Consejo de Ministros de 1 de junio de 2001 por el que se aprueba el Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2001-2006, en cuyo caso, sus características y las condiciones para su utilización deberán venir fijadas por el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares. El árido se suministrará, al menos, en dos (2) fracciones granulométricas diferenciadas.

Por esta razón y como se aludió anteriormente de que los ARA pertenecen a la familia de los RCD, está permitido por el PG-3 utilizar este tipo de AR como material granular tratado con cemento, sin excepción de categorías de tráfico.

McGARRAH [28], reviso la literatura de varios estudios que se realizaron en distintos estados de EE.UU. con la aplicación de ARA, dichos estudios se llevaron a cabo por los Departamentos de Transportes Estatales desde el 1993 al 2005. En los diferentes estudios se combinan datos de densidad, humedad, permeabilidad, CBR y módulo resiliente. Además, se analizaron diferentes incorporaciones de ARA en diferentes mezclas con AN. Los resultados no se pueden comparar directamente uno con otro, pero mediante la comparación de los ensayos realizados aparecen algunas tendencias generales. En la *Tabla 3.2* podemos observar las tendencias de las propiedades medidas en cada estudio. Si éstos no mezclan AN con ARA, la tabla compara el resultado del 100% de ARA con los de AN al 100%.

Tabla 3.2: Estudios realizados en diferentes estados de EE.UU. Fuente: [28].

Referencia	Mezclado ¹	Densidad Seca ²	Contenido de Humedad ²	Permeabilidad ²	CBR ²	Módulo Resiliente ²
Cooley (2005)	Si	Disminuye	Disminuye	---	Disminuye	---
Garg & Thompson (1996)	No	Disminuye	Aumenta	---	Disminuye	---
MacGregor (1999)	Si	---	---	Sin cambios	---	Aumenta
Bennert & Maher (2005)	Si	Disminuye	Disminuye	Disminuye	---	Aumenta
Papp (1998)	Si	Disminuye	Disminuye	---	---	Aumenta
Sayed (1993)	No	---	Disminuye	---	Disminuye	---
Taha (1999)	Si	Disminuye	Sin cambios	Aumenta	Disminuye	---
Trzebiatowski (2005)	No	Disminuye	---	Aumenta	---	---

1. Detalles del ARA si se mezcla con los AN.

2. Efecto de la propiedad del material, con el mayor porcentaje de ARA incorporado.

Como se observa en la tabla anterior, tres conclusiones generales se pueden hacer en relación con el uso de ARA como material de base o subbase de carreteras:

1. La densidad seca disminuye a medida que aumenta el porcentaje de ARA en la mezcla.
2. El valor de CBR disminuye a medida que el porcentaje de ARA aumenta.
3. Módulo Elástico aumenta a medida que aumenta el porcentaje de ARA.

3.4. Cemento Portland.

En un sentido amplio, se puede definir al cemento como aquel material conglomerante que tiene propiedades de adherencia y cohesión, las cuales les permiten unir fragmentos minerales entre sí para formar un todo compactado con resistencias y durabilidades adecuadas. En el área de la construcción, cuando hablamos de los materiales que constituyen el hormigón, implícitamente nos referimos al cemento, como cemento Portland o cemento a base de Portland. A estos también se les denominan cementos hidráulicos ya que tienen la propiedad de fraguar y endurecer en presencia de agua [4].

3.4.1. Origen del Cemento Portland.

Desde sus inicios y hasta la actualidad, los avances técnicos han transformado a este material en un elemento indispensable para el desarrollo social y la mejora de la calidad de vida de las personas [38].

El cemento Portland tal como lo conocemos hoy en día es un ligante hidráulico inventado en el siglo XVIII y obtenido de la molienda conjunta de clínker Portland; producto procedente de la calcinación a altas temperaturas de piedra caliza, arcilla, yeso y ciertas adiciones. Este se origina a partir de materiales minerales calcáreos, tales como la caliza (más del 60% compuesta de carbonato de calcio CaCO_3), y por alúmina y sílice, que se encuentra como arcilla en la naturaleza (aportando al proceso los óxidos de sílice SiO_2 , hierro Fe_2O_3 y aluminio Al_2O_3). Adicionalmente se agrega al final del proceso de producción el yeso, sulfato de calcio hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), con la finalidad de controlar el tiempo de fraguado del cemento.

Los cementos Portland sin adiciones no suelen utilizarse en capas de firmes, siendo lo más habitual recurrir a cementos con cenizas volantes, escorias de horno alto u otros tipos de adiciones puzolánicas o con hidraulicidad latente.

3.4.2. Proceso de Producción.

En la actualidad la producción del cemento está basada en un sistema totalmente automatizado como se muestra en la *Figura 3.4*, el cual incorpora diferentes procedimientos exhaustivos en el control de calidad en cada una de las fases del proceso.

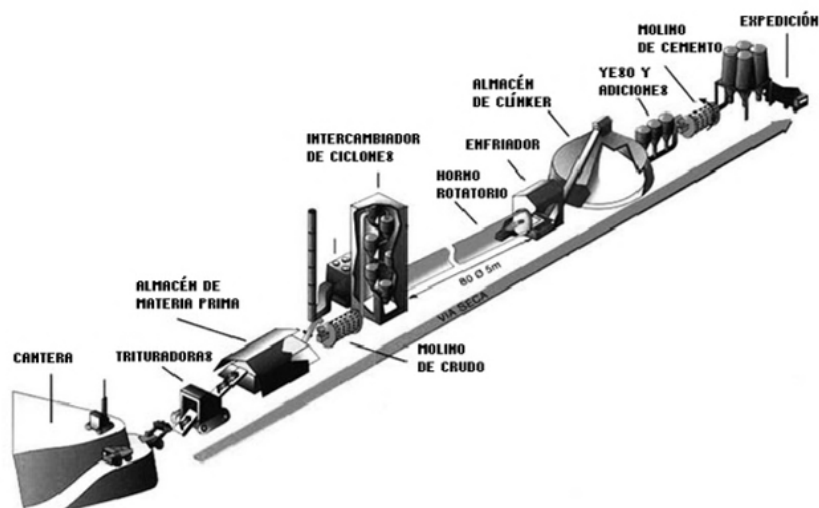


Fig. 3.4: Proceso de producción del cemento. Fuente: [38].

A partir de explotaciones a cielo abierto (canteras), se extrae la piedra caliza, materia prima del proceso. En la misma cantera, las rocas fragmentadas, que pueden llegar a medir un metro, se trituran en fases sucesivas para obtener fragmentos de hasta un máximo de 50 mm, que serán transportadas a los almacenes de prehomogeneización. Luego el material prehomogeneizado se transporta con medios mecánicos a los molinos de crudo, con la finalidad de conseguir la composición química adecuada según el tipo de clínker a producir y la granulometría deseada. El crudo molido, pasa a los silos de homogeneización para obtener, como su nombre lo indica, una nueva homogeneización y la corrección final de la composición química del producto.

Antes de entrar en el horno, el crudo pasa por el intercambiador de ciclones de precalcinación. Luego pasa a los hornos rotatorios de calcinación, donde sufre una serie de transformaciones físicas y químicas a medida que aumenta la temperatura que llega hasta 1500 °C. El clínker es enfriado mediante unas parrillas o tubos satélites adosados al final del horno, donde la temperatura alcanza los 140 °C aproximadamente para proceder a ser almacenado en grandes hangares o silos antes de llegar a la fase final del proceso de producción.

El clínker es dosificado con cantidades variables de yeso (3-10%) para alargar el tiempo de fraguado del cemento, y de otras adiciones (filler calcáreo, ceniza, caliza, etc.), con los que se obtienen diferentes calidades de cemento. Una vez dosificados el yeso y las adiciones, los materiales se muelen y se homogeneizan dentro de molinos de bolas de acero, con lo que se obtiene el producto final, el cemento Portland y por último es distribuido para su comercialización.

3.4.3. Componentes y Propiedades.

El cemento por lo general es llamado conglomerante hidráulico, debido a que es un material inorgánico finamente molido que amasado con el agua, fragua y endurece estando expuesto al aire o sumergido en agua. Este proceso es posible por la formación de una pasta que fragua y endurece en estas condiciones por medio de reacciones y procesos de hidratación y que, una vez endurecido conserva su resistencia y estabilidad hasta bajo el agua [43].

El proceso de endurecimiento hidráulico del cemento es provocado principalmente por la hidratación de los silicatos de calcio, también participan en el proceso otros compuestos químicos, como por ejemplo, los aluminatos. La suma de las proporciones de óxido de calcio (CaO) y de dióxido de silicio (SiO₂) reactivo es al menos del 50% en masa, cuando las proporciones son determinadas de acuerdo a la Norma Europea EN 196-2.

3.4.3.1. Propiedades Químicas:

Durante las diferentes etapas del proceso de fabricación, los compuestos interactúan entre sí para formar una serie compleja de productos hasta lograr alcanzar un estado de equilibrio químico. En general se suelen considerar cuatro compuestos principales del cemento, en la *Tabla 3.3* se pueden observar dichos compuestos.

Tabla 3.3: Compuestos del cemento Portland. Fuente: [9].

COMPUESTO	COMPOSICION DEL OXIDO	ABREVIATURA
Silicato Tricálcico	3CaOSiO ₂	C ₃ S
Silicato Dicálcico	2CaOSiO ₂	C ₂ S
Aluminio Tricálcico	3CaOAl ₂ O ₃	C ₃ A
Ferroaluminato Tetracálcico	4CaOFe ₂ O ₃ Al ₂ O ₃	C ₄ AF

Todos esos compuestos se forman en el interior del horno, pudiéndose decir que su proporción se presenta en fases, dando lugar a compuestos reales en el sentido químico; las proporciones calculadas de estos compuestos revelan importantes informaciones en cuanto a las propiedades del cemento. Para el cálculo de estas proporciones se han desarrollado muchos métodos, siendo el más reconocido el realizado R.H. Bogue (Composición Bogue).

FERNÁNDEZ CÁNOVAS [4] establece que las principales fases se pueden definir de la siguiente manera:

- Fase Alita (a base de C₃S): es la principal en la mayoría de los Clinker Portland y de ella depende el desarrollo de la resistencia mecánica.
- Fase Belita (a base de C₂S): es la segunda en importancia en el clinker y su componente principal (C₂S) se hidrata más lentamente. Su contribución al desarrollo de la resistencia empieza, en menor medida a partir de los 7 días, siendo la principal responsable de la resistencia a partir de los 28 días.
- Fase Aluminato (a base de C₃A): a pesar de que no se trata de un compuesto puro, sino de una solución sólida de C₃A con algo de impurezas de SiO₂ y de MgO, contribuye a una alta resistencia inicial, pero confiere al hormigón propiedades indeseables como cambios volumétricos y resistencia pobre a los sulfatos.
- Fase Ferrito (a base de C₄AF): realmente es una solución sólida que fluctúa desde C₂F hasta C₆A₂F. En esta fase la temperatura de clinkerización disminuye.

En las *Tablas 3.4 y 3.5* se presenta una idea general de la composición del cemento, pudiéndose observar los límites aproximados de los diferentes óxidos y las proporciones en que se encuentran los compuestos.

Tabla 3.4: Límites de composición aproximado en óxidos del cemento Portland. Fuente: [10].

OXIDO	CONTENIDO
CaO	60-67%
SiO ₂	17-25%
Al ₂ O ₃	3-8%
Fe ₂ O ₃	0,5-6%
MgO	0,1-4%
Álcalis	0,2-1,3%
SO ₃	1-3%

Tabla 3.5: Proporciones de los compuestos del cemento Portland. Fuente: [6].

OXIDO	CONTENIDO
C ₃ S	20-70%
C ₂ S	5-50%
C ₃ A	1-15%
C ₄ AF	1-17%

3.4.3.2. Propiedades Físicas y Mecánicas:

Las características físicas junto a las químicas, permiten que se pueda conocer las bondades de este material cementante. Dichas propiedades dependen del estado en el cual se encuentren, permitiendo estudiar las características físicas y mecánicas, a través de ensayos realizados en el laboratorio sobre el cemento puro, sobre mortero o sobre pasta de cemento, antes de ser usado. Entre las propiedades físicas y mecánicas más importantes del cemento, tenemos: peso específico, superficie específica, fraguado, falso fraguado y resistencia mecánica.

Peso Específico (Densidad): esta propiedad no define directamente la calidad del cemento, pero a partir de él se pueden deducir otras características cuando se analiza en conjunto con otras propiedades.

Existen muchos métodos para determinar la densidad del cemento entre los cuales se encuentran los de Le Chatelier (más conocido y utilizado), Schumann, Mann, Candlot y el método del picnómetro. Su valor varía muy poco y en un cemento Portland normal está comprendido entre 3,10 y 3,15 gr/cm³ [6].

Superficie Específica (Finura): es una propiedad vital del cemento, ya que está asociada a su valor hidráulico y debe controlarse con mucho cuidado. La importancia de ésta en la hidratación del cemento se debe a que se encuentra muy ligada a la velocidad de hidratación, de la reacción de los agregados reactivos alcalinos, de la contracción y susceptibilidad al agrietamiento, del tiempo de fraguado, de la cantidad de yeso requerida, del desarrollo de calor, del aumento de la resistencia a tempranas edades, entre otras; aunque si bien es cierto que obtener un cemento con

un grado de finura mayor puede resultar cementos con mejoras en algunas propiedades del hormigón, el coste de producción es sumamente elevado [4].

La finura obtenida por los diferentes métodos que se utilizan, es aproximadamente 3.400 y 4.500 cm²/gr [7].

Fraguado y Falso Fraguado del Cemento: es el cambio del estado plástico al estado endurecido de una pasta de cemento. Es muy importante diferenciar entre fraguado y endurecimiento, ya que esta última se refiere al aumento de la resistencia de una pasta de cemento fraguada [4].

En la práctica se hablan de dos tiempos principales del proceso de fraguado como son: el tiempo de fraguado inicial (tiempo desde la adición del agua) y el tiempo de fraguado final (tiempo cuando la pasta se vuelve rígida y alcanza su máxima temperatura).

Según el autor [6], los factores que influyen más en el tiempo de fraguado son:

- Composición química del cemento.
- Finura del cemento (a mayor finura, mayor velocidad de hidratación).
- Cantidad de agua de amasado.
- Temperatura ambiente.

Se conoce como Falso Fraguado a una rigidez prematura y anormal del cemento que se presenta en los primeros minutos después de haberlo mezclado con agua. Difiere del fraguado relámpago en que no se desprende calor en forma apreciable y, si se vuelve a mezclar la pasta de cemento sin añadirle agua, se restablece su plasticidad y fragua normalmente sin pérdida de resistencia [8].

Resistencia Mecánica: es la propiedad más importante del material, siendo dependiente de su composición química, finura y contenido de adiciones.

Dentro de las pruebas de resistencia, la tensión directa es muy poca usada y su utilización se ha enfocado para la determinación de la resistencia a un día del cemento Portland de fraguado rápido. La flexión directa ya no es aplicable en ningún país del mundo debido a que la resistencia a compresión es mayor que la flexión y a su dificultad de aplicación, por último la resistencia a compresión es la más usada hoy en día, debido a su gran importancia para las prestaciones estructurales que con lleva. Para este último, existen dos métodos estándar para probar su resistencia: uno utiliza mortero y otro hormigón [7].

3.4.4. Tipos de Cementos.

Según el RC-8 [5], basada en las normas UNE, en España se utilizan los cementos que presenta la *Tabla 3.6*. En ella se recogen varios tipos de cementos, por lo que su elección dependerá en muchos casos de la disponibilidad en la zona y de las prestaciones de cada tipo.

3.4.4.1. Cemento Tipo I:

Es el cemento Portland destinado a obras de hormigón en general, cuando en las mismas no se especifique la utilización de otro tipo. Libera más calor de hidratación que los otros tipos, además no contiene adiciones minerales.

3.4.4.2.Cemento Tipo II:

Es de moderada resistencia a los sulfatos, mayormente es utilizado en obras de hormigón en general y obras expuestas a la acción moderada de sulfatos o donde se requiera moderado calor de hidratación, cuando así sea especificado.

3.4.4.3.Cemento Tipo III:

Presenta alta resistencia inicial, como cuando se necesita que la estructura de hormigón reciba carga lo antes posible o cuando es necesario desencofrar a los pocos días del vaciado.

3.4.4.4.Cemento Tipo IV:

Se requiere bajo calor de hidratación en que no deben producirse dilataciones durante el fraguado.

3.4.4.5.Cemento Tipo V:

Utilizado donde se requiere una elevada resistencia a la acción concentrada de los sulfatos.

3.4.4.6.Cemento Tipo ESP VI:

Es utilizado para usos especiales.

Tabla 3.6: Tipos de cementos españoles. Fuente: [5].

TIPO DE CEMENTO	DESIGNACIÓN	Composición Porcentual (proporción en masa)						Componentes Minoritarios
		Componentes Principales						
		Clinker K	Escoria Homo Alto S	Humo de Sílice D	Puzolana	Cenizas Volantes	Caliza L	
CEM I	Cemento Portland	CEM I	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con escoria	CEM II/A-S CEM II/B-S	6-20 21-35	- -	- -	- -	- -	0-5 0-5
	Cemento Portland con humo de sílice	CEM II/A-D	-	6-10	-	-	-	0-5
CEM I	Cemento Portland con puzolana	CEM II/A-P CEM II/B-P	- -	- -	6-20 21-35	- -	- -	0-5 0-5
	Cemento Portland con ceniza volante	CEM II/A-V CEM II/B-V	- -	- -	- -	6-20 21-35	- -	0-5 0-5
	Cemento Portland con caliza	CEM II/A-L CEM II/B-L	- -	- -	- -	- -	6-20 21-35	0-5 0-5
	Cemento Portland mixto	CEM II/A-M CEM II/B-M	- -	- -	6-20 21-35	- -	- -	0-5 0-5
	Cemento de horno alto	CEM III/A CEM III/B CEM III/C	36-65 66-80 81-95	- - -	- - -	- - -	- - -	0-5 0-5 0-5
CEM IV	Cemento Puzolánico	CEM IV/A CEM IV/B	- -	- -	11-35 36-55	- -	0-5 0-5	
CEM V	Cemento compuesto	CEM V/A CEM V/B	18-30 31-50	-	18-30 31-50	-	0-5 0-5	
ESP VI	Cemento para usos especiales	ESP VI-I	25-55	45-79				0-5

3.5. Estructura de una Carretera.

Un firme de carreteras está constituido por un conjunto de capas superpuestas de forma horizontal, con la función de transmitir a la explanada las solicitaciones del tráfico, suficientemente amortiguadas para que puedan ser soportadas por ésta. También, debe proporcionar una superficie de rodadura cómoda y segura para el paso de los vehículos [35].

Las explanadas, aun las de mayor capacidad de soporte, constituidas por suelos granulares con pocos finos de reducida plasticidad o estabilidad in situ, no pueden resistir por sí solas más que un tráfico ligero y poco intenso. La acción directa de cargas que varía por rueda, con las presiones de 0,6 a 1 MPa usuales en los grandes vehículos de transporte de pasajeros y de cargas, produciría en poco tiempo importantes deformaciones.

La explanada es normalmente sólo el cimiento del firme, el cual tiene las siguientes funciones [1]:

1. Proporcionar una superficie de rodadura segura, cómoda y de características permanentes bajo las cargas repetidas del tráfico a lo largo de un tiempo suficientemente largo, (vida útil o período de proyecto) durante el cual sólo deben ser necesarias algunas actuaciones esporádicas de conservación, locales o de menor cuantía, además de una rehabilitación en las proximidades del final de la vida útil.
2. Resistir las solicitaciones del tráfico previsto durante el periodo de proyecto y repartir las presiones verticales ejercidas por las cargas, de forma que a la explanada solo llegue una pequeña fracción de aquellas compatible en todo caso con su capacidad de soporte *Figura 3.5*. Las deformaciones, tanto recuperables como remanentes, que se produzcan en la explanada y en las diferentes capas del firme deberán ser admisibles, teniendo en cuenta la repetición de las cargas y la resistencia a la fatiga de los distintos materiales.
3. Proteger la explanada de la intemperie y, en particular, de las precipitaciones, con sus efectos en la humedad y en la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos. En climas muy fríos, el firme constituye, además, una protección contra los efectos de la helada y del deshielo.

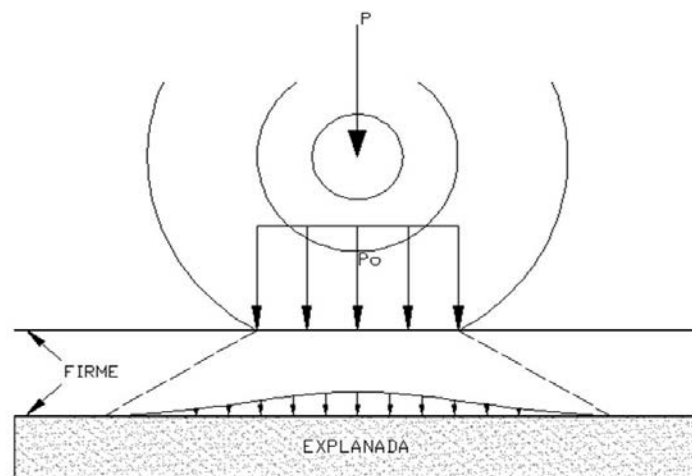


Fig. 3.5: Transmisión de la carga de una rueda a través del firme. Fuente: [1].

3.5.1. Características Funcionales y Estructurales.

Los firmes deben poseer unas determinadas características funcionales, que corresponden prácticamente a las superficiales del pavimento o capa superior del firme y que afectan especialmente a los usuarios. También deben tener unas características estructurales que interesan más específicamente a los organismos encargados de la conservación de los firmes y de la explotación de las carreteras.

Entre las características superficiales o funcionales podemos citar [1]:

1. La regularidad superficial del pavimento, tanto transversal como longitudinal, que afecta a la comodidad de los usuarios en mayor o menor medida en función de las longitudes de onda de las deformaciones y de la velocidad de circulación.
2. La resistencia al deslizamiento obtenida a través de una adecuada textura superficial, adaptada a las velocidades previstas de circulación y cuya influencia en la seguridad vial es decisiva.
3. El ruido de rodadura, tanto en el interior de los vehículos (usuarios) como en el exterior (entorno).
4. Las propiedades de reflexión luminosa, tan importante para la conducción nocturna y para el diseño adecuado de las instalaciones de iluminación.
5. El desagüe superficial rápido para limitar el espesor de la película de agua, salpicaduras, etc.

Las características estructurales están relacionadas con los materiales empleados en las capas del firme, en particular las mecánicas, y con los espesores de estas capas. La diferente deformabilidad de las mismas da lugar a discontinuidades de tensiones y/o deformaciones en los planos de contacto, por lo que el diseño de una capa ha de armonizarse con el de las restantes a fin de conseguir un buen comportamiento estructural conjunto.

Un análisis tensional da una idea de los efectos de las cargas del tráfico. El dimensionamiento del firme persigue en definitiva una optimización resistente de la estructura.

3.5.2. Tipos de Firmes.

La técnica actual cuenta con una gran variedad de firmes que suelen clasificarse en dos grandes grupos: firmes flexibles y firmes rígidos.

3.5.2.1. Firmes Flexibles:

Están formados por una serie de capas constituidas por materiales con una resistencia a la deformación que usualmente es decreciente con la profundidad, de modo análogo a la disminución de las tensiones transmitidas desde la superficie. Salvo los firmes no revestidos de caminos con baja intensidad de tráfico, los firmes flexibles tienen al menos una capa de rodadura bituminosa. En la *Figura 3.6*, se muestra como en un firme flexible se transmiten las cargas del tráfico a las capas inferiores de base, subbase y explanada.

El pavimento es la parte superior del firme y lo que soporta directamente las solicitaciones del tráfico. Aparte de las características funcionales, estructuralmente absorbe los esfuerzos horizontales y parte de los esfuerzos verticales.

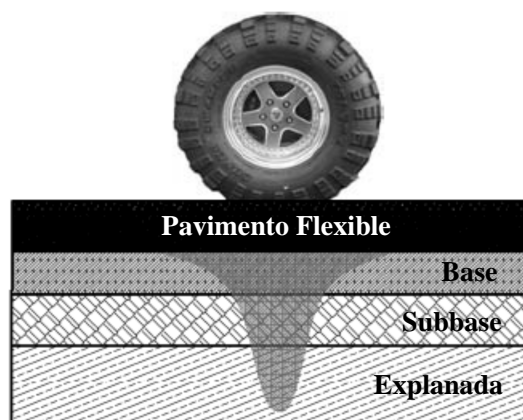


Fig. 3.6: Firme flexible. Fuente: [36].

Los pavimentos más comunes son los tratamientos superficiales por riego con gravilla y las mezclas bituminosas. Los primeros se emplean en firmes de nueva construcción para tráfico ligero y también para impermeabilizar y restaurar la textura de los pavimentos existentes. A este efecto se emplean también las lechadas bituminosas.

Las mezclas o aglomerados bituminosos se emplean en pavimentos de carreteras para tráfico medio y pesado y en vías urbanas. Cuando el espesor total del pavimento es superior a 10 cm se suelen ejecutar dos capas denominadas capa de rodadura y capa intermedia que presentan normalmente diferencias de composición, particularmente en lo que se refiere a las resistencias al pulimento del árido grueso.

El aumento de las intensidades y cargas del tráfico llevó a los firmes semirrígidos, con capas tratadas o estabilizadas con cemento o con un espesor importante (15 cm o más) de mezclas bituminosas (a veces estos firmes se denominan semiflexibles). Regularmente, los firmes semirrígidos y semiflexibles suelen incluirse en el grupo de los flexibles debido a que tienen unas capas superiores de bituminosas análogas, pero su comportamiento estructural es diferente, con una menor deformabilidad bajo las cargas.

Los firmes semirrígidos que están compuestos por una capa de suelocemento *Figura 3.7 A*, se asemeja a la placa de hormigón del pavimento rígido, sin embargo su rigidez es mucho menor y por esta razón admite deformaciones mayores, transmitiendo los esfuerzos al suelo de soporte por disipación y por repartición. Por esta razón el comportamiento de este tipo de pavimento es mixto, a pesar de todo se acepta una mayor similitud al pavimento rígido.

En términos amplios, un pavimento semirrígido es aquel en el que se combinan tipos de pavimentos diferentes, es decir, pavimentos “flexibles” y pavimentos “rígidos”, donde normalmente la capa rígida está por debajo y la capa flexible por encima. Es usual que un pavimento semirrígido comprenda una capa de base de hormigón o tratada con cemento Portland junto con una superficie de rodadura de asfalto. Los materiales tratados con cemento desarrollan la principal función resistente. Generalmente se disponen dos capas de estos materiales, aunque con tráfico medio o bajo se puede utilizar una capa única. La inferior suele ser de suelocemento y la superior de gravacemento *Figura 3.7 B*, hormigón magro u hormigón compactado. El pavimento de mezcla bituminosa suele tener un espesor relativamente pequeño y

sus funciones principales son las de dotar al firme de unas características superficiales adecuadas y de la necesaria impermeabilidad.

Una de las particularidades de los firmes semirrígidos con capas inferiores tratadas con cemento es el agrietamiento de éstas por su retracción hidráulica y térmica. Una opción para hacer frente a la reflexión de las grietas la constituyen los denominados firmes inversos *Figura 3.7 C*, en el que se interpone entre las capas bituminosas superiores y la capa tratada con cemento una capa granular (formada exclusivamente por áridos) para evitar la transmisión de tensiones tangenciales.

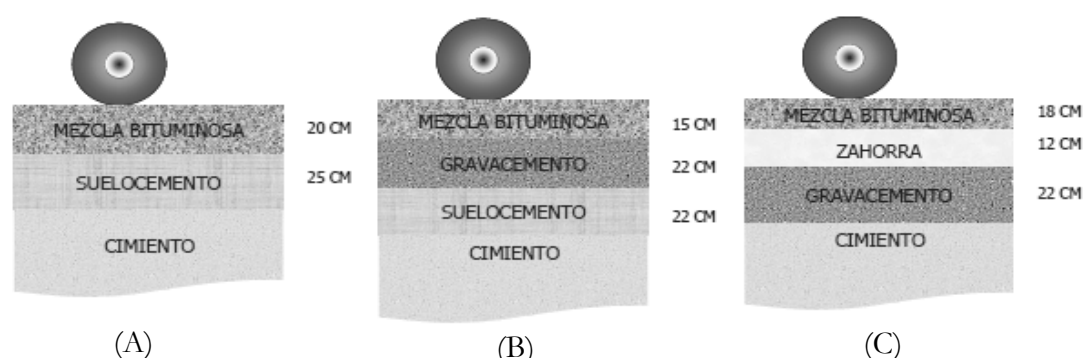


Fig. 3.7: Firmes semirrígido: (A) con base de suelocemento; (B) con base de gravacemento; (C) inverso. Fuente: [12].

3.5.2.2. Firmes Rígidos:

Tienen una capa de hormigón que asegura la función resistente. Están constituidos por un pavimento de hormigón, apoyado sobre la explanada o sobre una capa, de material seleccionado, la cual se denomina base y a veces incluso de una capa subbase. Debido a la alta rigidez del hormigón así como su elevado coeficiente de elasticidad, la distribución de los esfuerzos se produce en una zona muy amplia como podemos ver en la *Figura 3.8*. Además, el hormigón es capaz de resistir en cierto grado esfuerzos a la tensión, el comportamiento de un pavimento rígido es suficientemente satisfactorio aun cuando existan zonas débiles en las capas inferiores. La capacidad estructural de un pavimento rígido depende de la resistencia de las losas y, por lo tanto, el apoyo de las capas subyacentes ejerce influencia en el diseño del espesor del pavimento.

Tradicionalmente, se han empleado otros tipos de firmes de piedra más o menos labrada, tales como el adoquinado, el mosaico y el hormigón blindado. En la actualidad, tienen un gran desarrollo los adoquines de hormigón asentados sobre una delgada capa de nivelación de arena y una base. Este tipo de firme, que no puede considerarse como rígido y que a veces se denomina articulado, se emplea tanto para tráfico muy pesado como muy ligero.

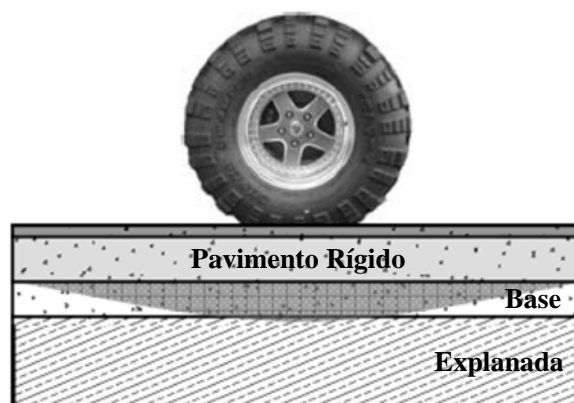


Fig. 3.8: Firme rígido. Fuente: [36].

3.5.3. Bases y Subbases.

La base es la capa del firme situada debajo del pavimento, su función es eminentemente resistente, absorbiendo la mayor parte de los esfuerzos verticales y su rigidez o su resistencia a la deformación bajo las solicitaciones repetidas del tráfico, suele corresponder a la intensidad del tráfico pesado. Así, para tráficos medios y ligeros se emplean las tradicionales bases de zahorra artificial y en algún caso aunque menos de macadam. Para tráficos pesados se emplean ya materiales granulados tratados con un ligante o conglomerante: normalmente, bases de mezcla bituminosa y bases de gravacemento. Otras bases empleadas son las de gravaescoria, gravaemulsión, gravacenizas y suelocemento (tráficos ligeros) [11].

La función fundamental de la base de un pavimento consiste en proporcionar un elemento resistente que transmita a la subbase y a la explanada los esfuerzos producidos por el tránsito en una intensidad apropiada.

La subbase es la capa de firme situada debajo de la base y sobre la explanada. Esta capa puede no ser necesaria con explanadas granulares de elevada capacidad de soporte. Su función es proporcionar a la base un cimiento uniforme y constituir una adecuada plataforma de trabajo para su puesta en obra y compactación. En todo caso, la subbase suele ser una capa de transición necesaria. Se emplean subbases granulares constituidas por zahorra y arenas naturales o de machaqueo, suelos estabilizados con cemento, escorias cristalizadas de horno alto, etc. [11].

Entre las capas tratadas para bases y subbases se incluyen materiales tales como el suelocemento, la gravacemento, la gravaescoria, la gravaceniza y la gravaemulsión. También pueden incluirse algunas de las mezclas bituminosas empleadas en bases. Según los autores [1], estos materiales tienen en común diversas características:

1. Están constituido por mezclas de materiales granulares, un aditivo que es un conglomerante (cemento, escoria granulada, etc.) o un ligante hidrocarbonado (emulsión bituminosa) y agua. El material granular tiene una granulometría continua y compacta, y es relativamente estable aun sin el aditivo.
2. La cantidad de aditivo es generalmente pequeña. Gracias al esqueleto mineral y a la escasa actividad de los finos de este, sus efectos son, sin embargo, notables y el material

resultante tiene una resistencia mecánica y un módulo de deformación elevados y es poco sensible a la acción del agua.

3. La mezcla se lleva a cabo en una central de fabricación automatizada. Estas centrales suelen ser de funcionamiento continuo y conviene que tenga unos dispositivos para dosificar en masa los componentes. El material se transporta al lugar de la puesta en obra en camiones volquete y se extiende normalmente con extendedoras; si no hay problemas de trabajabilidad de la mezcla, pueden emplearse también motoniveladoras, pero con ellas la regularidad superficial conseguida suele ser peor que con las extendedoras. El elevado razonamiento interno de la mezcla requiere el empleo de compactadores pesados (vibratorios, de neumáticos a alta presión, mixtos) para poder alcanzar una elevada compacidad, imprescindible para lograr una resistencia suficiente.

3.5.3.1. El Suelocemento:

El material denominado suelocemento se obtiene por la mezcla en central de un material granular con cemento, agua y eventualmente adiciones; seguida de una compactación y un curado adecuados. El material granular es generalmente una mezcla de gravas y arenas o un suelo de reducida plasticidad. Sus propiedades finales dependen de:

- Tipo de material granular (especialmente la proporción y naturaleza de sus finos).
- Proporción de cemento y de agua.
- Proceso de ejecución.
- Curado y edad de la mezcla compactada.

Al añadirle cemento al material granular, el índice de plasticidad de éste disminuye y su densidad máxima y su humedad óptima varían ligeramente en un sentido u otro según el tipo de material. La resistencia aumenta con el contenido de cemento, la densidad alcanzada y la edad de la mezcla.

La cantidad de cemento necesaria para obtener un material suficientemente resistente es variable, dependiendo del tipo de material granular. La dosificación precisa de cemento ha de fijarse en el laboratorio mediante ensayos de durabilidad o resistencia sobre probetas con diferentes contenido de cemento. Se exige un valor mínimo de la resistencia a la compresión a los siete días de 2,5 MPa y un máximo de 4,5 MPa; [14]. Habitualmente, la proporción de cemento en un suelocemento se sitúa entre el 3 y el 7% sobre la masa seca del suelo [1] y [12].

Como se ha indicado, para las capas de firme se suele recurrir a la mezcla en central (lo que requiere el transporte del suelo hasta ella), porque solo así se puede garantizar una suficiente homogeneidad del producto final. Sin embargo, cuando se ha producido in situ con elementos adecuados y rigor de proyecto y ejecución se han obtenido obras de calidad correcta. Existen numerosos tramos ejecutados que lo prueban, como por ejemplo el estudio realizado por SAMPEDRO et al. [48].

En todos los casos es conveniente que la compactación se inicie cuando la humedad del material sea la prescrita y debe terminarse en un periodo de dos a cuatro horas, según las condiciones atmosféricas. Con los suelos granulares habitualmente utilizados para la fabricación de suelocemento deben emplearse rodillos vibratorios y compactadores de neumáticos. Se deben

exigir densidades elevadas no inferiores al 97% de las máximas obtenidas en el ensayo Proctor modificado.

La calidad requerida exige, además, un adecuado proceso de curado: tras la extensión y la compactación de la capa, hay que regarla con una emulsión bituminosa de rotura rápida que impida la evaporación prematura del agua necesaria para el fraguado del conglomerante. Sobre la capa terminada suele prohibirse la circulación de todo tipo de tráfico al menos durante tres días, pero lo que es imprescindible es su protección mediante un riego de sellado con arena si va haber circulación antes de colocar las capas superiores.

3.5.3.2. La Gravacemento:

La gravacemento es el material tradicional de las capas de base de los denominados firmes semirrígidos. Se puede emplear también bajo los pavimentos de hormigón. Sin embargo, la misión de la gravacemento no es la misma en los dos casos.

En los firmes semirrígidos desempeña un papel fundamentalmente estructural, absorbiendo la mayor parte de las tensiones procedentes del tráfico. Se requiere, por tanto, que la gravacemento sea no solo un material de una rigidez apreciable (el módulo de elasticidad supera fácilmente, al cabo de unos meses, los 20.000 MPa), sino también una significativa resistencia a flexotracción (suele ser del orden de 1,5 MPa). Para alcanzar de manera efectiva la resistencia esperada, hay que lograr la máxima densidad posible. Por otro lado, para que las tracciones en su cara inferior no sean demasiado elevadas, es conveniente un espesor no inferior a 20 cm y que la subbase tenga también una rigidez apreciable (normalmente dicha subbase es un suelocemento). Es importante tener en cuenta que cualquier merma en el espesor tiene unas repercusiones graves en la vida útil de la capa de gravacemento.

La cantidad de cemento necesaria para obtener un material suficientemente resistente es variable, dependiendo del tipo de material granular. La dosificación precisa de cemento ha de fijarse en el laboratorio mediante ensayos de durabilidad o resistencia sobre probetas con diferentes contenido de cemento. Se exige un valor mínimo de la resistencia a la compresión a los siete días de 4,5 MPa y un máximo de 6 MPa para arcenes y 4,5 – 7 MPa para calzadas [14]. En los firmes semirrígidos se exige que la gravacemento tenga una resistencia mínima, en ensayos de compresión simple a los siete días, de 6 MPa. Esta resistencia se consigue, dependiendo de los áridos empleados, con unos contenidos de cemento que pueden variar entre el 3,5 y el 5% sobre la masa seca de los áridos. Del límite inferior indicado no se debe bajar por problemas de homogeneidad de la mezcla; también no es conveniente que la resistencia sea excesiva. Al ser un material tratado con cemento, la gravacemento se agrieta por retracción y por las variaciones de temperatura y de humedad (igual que el suelocemento, pero en este el fenómeno se produce de una manera más atenuada por la estructura de su esqueleto mineral). Este agrietamiento puede acabar reflejándose a través del pavimento bituminoso a más o menos largo plazo según los gradientes térmicos e higrométricos y el espesor de dicho pavimento. Con un tráfico pesado intenso, las grietas reflejadas, si están muy abiertas, pueden degradarse con pérdida de material y entrada de agua.

Una variable fundamental, tanto en la resistencia como en el agrietamiento, es el contenido de agua existente en la mezcla en el momento de su compactación. Debe ser del orden de un 0,5%

menos de la humedad óptima del ensayo Proctor modificado, a fin de que se pueda alcanzar la máxima resistencia.

3.6. Dimensionamiento de Bases y Subbases.

El dimensionamiento de un firme, es definir los materiales y espesores de las capas que los constituyen. Existen diferencias entre unos firmes y otros, que condicionan las metodologías de dimensionamiento [11].

Geométricamente, los firmes flexibles, si no están agrietados, pueden ser considerados indefinidos en el plano horizontal en relación a la superficie en que se aplican las cargas. En cambio, los firmes rígidos están formados por losas, más o menos cuadrangulares, en las que los fenómenos de borde, adquieren singular importancia [11].

Como se explica anteriormente, en los firmes flexibles hay un reparto relativamente gradual de las tensiones provocadas por las cargas de tráfico y en los rígidos el pavimento es una losa que trabaja a flexotracción y que absorbe la casi totalidad de dichas tensiones.

El dimensionamiento consiste en la determinación del espesor de cada capa del firme a partir de la consideración de una serie de factores básicos como son: tráfico, capacidad de soporte de la explanada, materiales disponibles, condiciones climáticas y otros factores.

Los métodos de dimensionamiento nos permiten fijar los materiales y espesores de las capas del firme tomando en cuenta más o menos estos factores básicos de proyecto. Estos métodos de dimensionamiento se agrupan en dos familias de acuerdo con su procedencia y desarrollo. Por una parte, están los métodos analíticos, que modelizan el comportamiento del firme y determinan el estado de tensiones a que está sometido, y por otra parte, los empíricos, basados en la observación del comportamiento de tramos experimentales o de firmes en servicio [35].

3.6.1. Métodos Analíticos.

El dimensionamiento analítico de los firmes se basa, análogamente a otras estructuras consideradas en ingeniería, en el cálculo de las tensiones, deformaciones y desplazamientos producidos por las cargas del tráfico y las variaciones climáticas.

Estos métodos requieren una modelación previa tanto de la sección estructural como de las cargas. A partir de la misma se establecen los correspondientes algoritmos para el cálculo de las tensiones, deformaciones y desplazamientos. El análisis de estos resultados se dirige a determinar el número de aplicaciones de la carga modelo que puede soportar la estructura antes de llegar a la rotura. Si dicho número admisible de aplicaciones de carga supera el esperado según los correspondientes estudios del tráfico sólo basta comprobar la sección analizada desde los puntos de vista constructivo y económico.

3.6.2. Métodos Empíricos.

Estos métodos proporcionan para cada combinación posible de los factores básicos de dimensionamiento, soluciones que se han obtenido por acumulación de experiencias sobre el comportamiento normal de los firmes en tramos de carreteras con tráfico real, tramos experimentales con tráfico especial o pistas de ensayo.

Los denominados métodos empíricos de dimensionamiento de firmes proponen secciones estructurales cuyo comportamiento ha sido contrastado experimentalmente, pero que a menudo han sido también comprobadas analíticamente. Todos los métodos empíricos tienen en común la sistemática siguiente:

1. Adopción de un periodo de proyecto o tiempo que el firme tarda en llegar a un grado de deterioro que hace necesaria su rehabilitación estructural.
2. Determinación de los factores básicos de dimensionamiento:
 - a) Valoración del tráfico de proyecto: número de vehículos pesados durante un día medio, ejes equivalentes de la carga tipo acumulados durante el periodo de proyecto o durante un día medio, etc.
 - b) Caracterización de la capacidad de soporte de la explanada: índice CBR, módulo de reacción K, etc.
 - c) Definición de los materiales normalizados para las distintas capas del firme.
 - d) Caracterización, en general de manera muy esquemática, de las condiciones locales y estacionales: temperaturas, pluviometría, condiciones de drenaje, etc.
3. Presentación de la solución o soluciones, para cada combinación posible de los factores básicos, en una forma propia de cada método: ábacos, tablas, catálogos de secciones estructurales.

Hay que destacar que cualquier método empírico es de muy difícil aplicación fuera del ámbito en el que ha sido diseñado.

En el campo de los firmes flexibles, los métodos más conocidos son los de la empresa Shell (1978) y del Asphalt Institute norteamericano (1981). Para los firmes rígidos el más difundido es el de la Portland Cement Association (PCA, 1984). Un método que contempla ambos tipos de firmes es el de la AASHTO (1986).

En Europa (Gran Bretaña, Alemania, Francia, España, etc.) se han impuesto desde hace más de veinte años métodos empíricos, desarrollados por las correspondientes administraciones estatales, cuyas soluciones vienen dadas en forma de catálogos de secciones estructurales. En 1975 la Dirección General de Carreteras publicó en España las Normas 6.1 IC (firmes flexibles) y 6.2 IC (firmes rígidos) para carreteras estatales de nueva construcción. La primera revisión de las mismas se tradujo en 1986 en una "Instrucción sobre Secciones de Firme en Autovías". En los años siguientes continuaron los trabajos de revisión a fin de modificar las secciones normalizadas para todo tipo de carreteras.

En la actualidad, los métodos analíticos y empíricos tienden a converger; mientras que los analíticos requieren de la experiencia para una adecuada modelación y para la interpretación de los resultados del cálculo, los empíricos se apoyan a menudo en la realización de cálculos como contraste de la experiencia. Debe apuntarse que el progreso actual en los métodos de dimensionamiento está más ligado a la gestión de los firmes que a su proyecto.

Los principios del dimensionamiento son aplicables tanto a los firmes flexibles o firmes que tienen un pavimento bituminoso, como a los rígidos. Sin embargo, existen algunas diferencias entre unos y otros que condicionan la aplicación práctica de los métodos. Estructuralmente, en

los firmes flexibles hay un reparto relativamente gradual de las tensiones provocadas por las cargas del tráfico. En los rígidos, el pavimento es una losa que trabaja a flexotracción y que absorbe la casi totalidad de dichas tensiones. En los firmes flexibles, la temperatura, principal variable climática a considerar, influye en la rigidez de los materiales bituminosos, mientras que en los firmes rígidos, los gradientes térmicos provocan deformaciones (alabeo o combado de las losas) que por sí solas son el origen de tensiones, que pueden ser comparables en magnitud a las debidas a las cargas del tráfico.

3.6.2.1. Método AASHTO:

Este método empírico de dimensionamiento, originalmente conocido como AASHO, se desarrolló en los Estados Unidos en la década de los 60, el mismo está fundamentado en un ensayo a escala real que fue realizado durante 2 años en el estado de Illinois, el fin de este era desarrollar tablas, gráficos y fórmulas que representen las relaciones deterioro-solicitud de las distintas secciones ensayadas.

Según KRAEMER et al. [1], es el método empírico de dimensionamiento que ha logrado mayor difusión. Este método cuya versión actual es de 1986 modificada en 1993, procedente de otras publicaciones anteriores desde 1962 y basadas en los resultados del ensayo AASHO.

A partir de la última versión y su modificación de 1993, el método comenzó a introducir conceptos mecanicistas para adecuar algunos parámetros a condiciones diferentes a las que dominaron en el lugar del ensayo original. KRAEMER et al. [1], establecen que el método AASHTO de dimensionamiento está organizado en las siguientes cuatro partes:

- ✓ Principios de proyecto y de gestión de los firmes.
- ✓ Procedimientos de dimensionamientos para la construcción o la reconstrucción de firmes.
- ✓ Procedimientos de dimensionamiento para la rehabilitación de firmes.
- ✓ Directrices para el eventual empleo de métodos analíticos en el proyecto y en la evaluación de las secciones estructurales de firme.

La guía AASHTO presenta procedimientos para el análisis y el diseño de pavimentos flexibles y rígidos, nuevos y rehabilitados. La metodología de diseño se basa en un procedimiento empírico-mecanicista, que integra el comportamiento de los materiales, el clima y las cargas del tránsito, durante el transcurso del tiempo; partiendo de la elaboración de modelos que simulan las estructuras de los pavimentos.

3.7. Uso de los ARH y ARA como Bases y Subbases de Carreteras.

3.7.1. Áridos Reciclados de Hormigón (ARH).

De la familia de los RCDs, los ARH son los que presentan mayor campo de aplicación y que hasta ahora han dado mejores resultados; estos áridos pueden utilizarse en la fabricación de hormigones. Sus aplicaciones más habituales en capas de firmes son como hormigón magro, hormigón vibrado (con rodadura de 4 cm de hormigón con AN), capas de base de hormigón y hormigón en pavimentos de arcenes.

Los ARH se encuentran en una mayor demanda y se puede utilizar en productos de mayor valor agregado, como por ejemplo la fracción gruesa se puede utilizar en la fabricación de

hormigón estructural [20] , [21] y [22]. En consecuencia, muchos países han incluido en su normativa la posibilidad de la sustitución parcial de la fracción gruesa del árido natural con ARH en porcentajes que oscilan entre el 20 y el 50% [18] y [19]. Pese a todo, y probablemente por una poca justificada desconfianza respecto a la calidad de los ARH, la aplicación más común de este tipo de AR es en capas de base o subbases granulares de nuevos firmes, tratadas o sin tratar.

La incorporación de los materiales reciclados procedentes de RCD a la infraestructura de una carretera, puede hacerse, siempre que se cumplan las condiciones técnicas y medioambientales exigidas, como materiales para explanaciones; en terraplenes y rellenos, y como AR para distintas capas del firme.

Existen a nivel internacional una amplia experiencia en la utilización de AR procedentes de hormigón en capas de firmes de carreteras, fundamentalmente en capas granulares. En Europa es práctica habitual en países como Francia, Reino Unido, Países Bajos, Alemania, Austria, Suiza y Dinamarca.

En España, se están utilizando AR procedentes de hormigón en capas granulares en polígonos industriales y urbanizaciones. En carreteras autonómicas y estatales la utilización ha sido escasa y generalmente no figuran relacionadas, ni se ha hecho un seguimiento de su comportamiento.

SAMPEDRO et al. [48], realizaron un estudio en el desdoblamiento de la carretera C-35 tramo Vidreres-Llagostera. Iniciado en el año 2008 en la comunidad autónoma de Cataluña, se utilizaron RCD limpios procedentes de hormigón para la formación de una capa de suelocemento. Este planteamiento surge con la intención de aprovechar al máximo la realización del tramo, utilizando un residuo proveniente del mismo sector de la construcción y que se encuentra disponible en gran parte del territorio español. Los resultados obtenidos de esta experiencia han sido totalmente satisfactorios. Respecto a la caracterización del material para su empleo en suelocemento en capas de firmes se observa que el AR utilizado cumple con todas las exigencias del PG-3. Por otro lado, los ensayos realizados a la unidad terminada arrojan resultados de densidad in situ, resistencia mecánica y capacidad soporte, que están por encima de los exigidos para un suelocemento.

JIMENEZ et al. [16], muestran una evaluación técnica de tres ARH, procedentes de tres plantas de tratamiento con diferentes procesos de reciclado situadas en Córdoba (España), como material para la construcción de subbases de carreteras. Los AR de RCD se han evaluado como ahorras para la construcción de subbases de carreteras. Los resultados muestran que los ARH cumplen todas las especificaciones del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras de España (PG-3) para su uso en capas estructurales (subbase) de las categorías de tráfico T3 y T4. Los resultados se compararon con una ahorra artificial caliza como árido natural.

AGRELA et al. [17], realizan un estudio para evaluar el comportamiento de dos mezclas de AR mixtos, a través de pruebas de laboratorio y con secciones experimentales, para luego compararlos con un árido natural; todos los áridos fueron tratados con cemento. Se estudiaron las propiedades de dos AR mixtos y AN en el laboratorio, para probar su viabilidad en una aplicación real como áridos tratados con cemento, utilizados como subbase en un camino. En septiembre de 2009, se construyeron dos tramos de una rampa de acceso a una autopista ubicada en Málaga, España. Varias pruebas se realizaron para evaluar su desempeño. Los AR utilizados en

esta investigación fueron dos tipos de RCDs, los cuales se procesaron en una planta de tratamiento en Aristerra, Málaga. Estos residuos fueron caracterizados por las diferentes proporciones de sus componentes hormigón triturado y albañilería triturada.

Los resultados de este estudio muestran que el uso de algunos de estos agregados en las carreteras es totalmente factible y que los beneficios asociados con estos agregados se extienden más allá de los aspectos ambientales de su uso. En conclusión, es posible el uso de AR tratados con cemento en la construcción de bases y subbases de carreteras, incluso si contienen una proporción de mampostería, si el procesamiento del mismo es el adecuado y la calidad de la aplicación se controla estrictamente. En consecuencia, desde un punto de vista medio ambiental y económico, los AR son una buena alternativa a los materiales naturales.

PEREZ et al. [31], estudiaron la eficiencia de la utilización del ARH, tratados con cemento en la construcción de una carretera en Málaga, España. Algunas secciones de este camino se construyeron utilizando materiales granulares reciclados tratados con cemento, como lo es la aplicación de ARH para formar una capa de base tratada con cemento. El árido grueso natural fue sustituido por la fracción gruesa de ARH, y se aplicó arena natural para completar la mezcla de materiales granulares reciclados tratados con cemento. Igualmente, antes de usar los materiales en la ejecución de la carretera, se estudiaron las propiedades del material y, además, las pruebas de auscultación se llevaron a cabo en el corto y largo plazo para evaluar el comportamiento mecánico de los materiales y su evolución en el tiempo.

Los autores de este estudio, concluyen que es posible utilizar ARH en la producción de materiales granulares tratados con cemento, pero sólo si existe un control exhaustivo de la producción ARH, así como una buena ejecución de la carretera. No se puede ignorar la evidencia de que la aplicación de estos ARH es el medio ambiente, ya que reducen los usos de AN.

EL-MAATY [32], habla sobre un extenso programa de laboratorio para estudiar la viabilidad de la utilización de ARH y mezclado con el árido de piedra caliza convencional, que se está utilizando actualmente en las bases o subbases en Egipto. Por otra parte, se investigó la influencia de las variables de mezcla en las propiedades mecánicas del AR tratado con cemento. Se establecen modelos para predecir las resistencias a la compresión y a tracción, en función de parámetros de mezcla. Los resultados muestran que la adición de ARH mejora las propiedades mecánicas de la mezcla en la que la resistencia a la compresión no confinada se toma como un indicador de calidad importante. Las variables que influyen en la resistencia a la compresión no confinada como el contenido de cemento, el tiempo de curado, la densidad seca juegan un papel importante para determinar el rendimiento de los AR tratados con cemento.

El autor concluye que con el aumento de los ARH por los áridos de piedras calizas naturales, la densidad máxima y los valores de CBR de mezclas no tratadas disminuyen y el contenido de humedad óptimo aumenta. Los valores de CBR de los AR sumergidos, se encuentran dentro de los límites permitidos en Egipto. Por otra parte, la mezcla de hormigón con AR, dan deformación plástica mínima mientras que el módulo resiliente máximo se consigue con el AR mixto a 75%. El tratamiento con cemento conduce a una mejora valiosa en el módulo resiliente, llega al 35% en la sustitución de un 75% de AR mixto y la deformación plástica llega a 60% cuando se utiliza 100% de AR mixto.

POON & CHAN [39], desarrollaron un estudio de la Universidad Politécnica de Hong Kong para investigar la posibilidad de utilizar ARH y ladrillos de arcilla triturada en forma de agregados de materiales no consolidados para subbase. Los resultados mostraron que el uso de 100% ARH aumentaron el contenido de humedad óptimo y la disminución de la densidad máxima en seco de los materiales en comparación con las de los materiales naturales de la subbase. Por otra parte, la sustitución de los ARH por ladrillo de arcilla machacada aumentaba el contenido de humedad óptimo y disminuía de la densidad seca máxima. Esto se atribuyó principalmente a las partículas de menor densidad y una mayor absorción de agua por el ladrillo de arcilla triturado en comparación con los de los agregados reciclados de hormigón. Los valores de CBR (sin sumergir o sumergido) de los materiales de subbase preparadas con 100% de ARH eran más bajos que los de aquellos con AN de la subbase. Los valores del CBR se redujeron aún más a medida que el nivel de reemplazo de áridos reciclados de hormigón y ladrillo de arcilla triturada aumentaba. Sin embargo, los valores de CBR en condición sumergida para todas las subbases de reciclados fueron mayores al 30%, que es la resistencia mínima requisito establecida en Hong Kong. Además, el porcentaje de hinchamiento para todas las subbases eran menos de 0,13%, lo que puede ser considerado insignificante.

3.7.2. Áridos Reciclados Asfáltico (ARA).

Este tipo de AR presenta un reducido campo de aplicación. La utilización de ARA, se ha limitado en aplicación de bases y subbases en firmes de carreteras.

MARSHALL BLEAKLEY [23], efectuó una investigación para desarrollar métodos que puedan mejorar la resistencia de ARA y reducir la fluencia a un nivel aceptable mediante la mezcla con árido caliza de alta calidad y estabilización química con emulsión de asfalto, cemento Portland, o cal. La mezclas de ARA y árido convencional con y sin estabilización química se compactaron por Proctor modificado, Marshall, o métodos giratorias, curado, y la prueba de resistencia y deformación. Los ensayos de resistencia incluyen Limerock Bearing Ratio (LBR), una variante de la prueba de CBR, la compresión no confinada, la compresión de Marshall, y ensayos de tracción indirectos.

La mezclas de ARA y árido convencional tienen el potencial de ser utilizado con éxito como un material de capa de base. Las mezclas de 50% ARA con 50% de material caliza, alcanza una resistencia de LBR sumergido de 100 y niveles aceptables de fluencia con la adición de un 1% de emulsión de asfalto o cemento. Las mezclas de 25% ARA con 75% de caliza sin ningún estabilizador químico, alcanzaron una resistencia LBR sumergido cerca de 100 y bajos niveles de fluencia.

En la compactación giratoria se alcanzaron densidades más altas que en el Proctor Modificado o Marshall compactación, la resistencia mejora con ARA por un factor de dos a tres comparado al Proctor modificado con la misma densidad, pero tuvo menos efecto en la fluencia. Se requiere una prueba de campo para determinar si es factible reproducir los resultados de compactación giratorias en un sitio de construcción real. Se observó una variabilidad significativa entre los resultados con diferentes mezclas, métodos de compactación, y agentes estabilizantes.

FOYE [24], evaluó la utilización de ARA como capa de base para la rehabilitación de un estacionamiento de 19500 m² en Fort Snelling, Minnesota. El trabajo fue completado bajo la dirección del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE.UU. (USACE) y los Distritos de

Kansas City y San Pablo. El pavimento asfáltico existente se molió y almacenó para su reutilización en el nuevo pavimento como base. El ARA repuesto de base se compactó con rodillos vibratorios. La observación de campo fue que el ARA drena rápidamente, lo que dificulta su compactación. La compactación era mucho más eficaz con la adición frecuente de agua, logrando una base firme en menos pasadas de los compactadores, pasando la prueba de penetrómetro de cono dinámico, y que no presenta una deformación permanente o deformación bajo las pruebas.

La observación principal de este proyecto fue el drenaje y la compactación del ARA. En el campo, los ARA drenan rápidamente. Los efectos de aglomeración, en su ligante de asfalto residual dentro del ARA hacen que las partículas más finas se adhieran unas a otras, así tienden a reducir la cantidad de finos disponibles para retener el agua. Además se requiere una frecuencia de agua necesaria para la compactación eficaz. El rendimiento técnico y económico del ARA en base fue visto como un éxito en esta aplicación.

ALAM et al. [25], investigaron la capacidad estructural de las capas de base que consiste en ARA mezclado con cantidades variables de áridos convencionales. La capacidad fue evaluada mediante pruebas de módulo resiliente (M_r). Las pruebas se realizaron con ARA y ARA/mezclados con AN, cada uno con diferentes contenidos de humedad y densidades. El contenido de ARA varió entre 100% ARA, 30%, 50% y 70% ARA/mezclado con materiales clase 6 y 50% ARA/mezclados con taconita. El contenido de humedad varió entre 7,0% y 8,0%. La densidad seca varió entre 2,00 Mg/m³, 2,08 Mg/m³ y 2,16 Mg/m³.

Las pruebas de las muestras con un contenido variable de ARA, mostraron que el módulo resiliente aumentó con el contenido de ARA, lo que indica que éste mejora la resistencia a una carga cíclica, que es una propiedad crítica para un material de capa de base. El aumento del contenido de ARA y la densidad seca correlacionada con el aumento del contenido de humedad no tuvo ningún efecto significativo sobre el módulo resiliente.

En el estudio los autores utilizaron los resultados de módulo resiliente como insumos para la guía AASHTO para el diseño mecánico-empírico de estructuras de pavimentos nuevos y rehabilitados 2002 (MEPDG) para predecir el efecto del contenido de ARA, en el rendimiento del pavimento. Los ensayos se basaron con las mezclas de ARA en un 0%, 30%, 50%, 70% y 100% para la subbase granular. Para el ensayo ARA 0%, el pavimento estructural constaba de 15 cm de mezclas bituminosas en caliente y de 38 cm de material de AASHTO A-I-b. Los resultados mostraron que a medida que aumentó el contenido de ARA, las formaciones de grietas por fatiga de la mezcla de hormigón asfáltico en caliente disminuyeron y que los altos contenidos de ARA produjeron menor fatiga. El contenido de ARA tenía un efecto mínimo sobre la formación de huellas que se había señalado en la subbase. La diferencia entre el 0% y el 100% de mezcla de ARA fue inferior a 0,05 pulgadas de eficacia.

MOKWA & PEEBLES [26], evaluaron los cambios en las propiedades de ingeniería de los suelos granulares a partir de diversas fuentes en Montana después de mezclarlos con ARA. La investigación se centró en las propiedades primarias de la ingeniería, con inclusión de compactación, gradación, resistencia, rigidez, permeabilidad y resistencia a la degradación. El ARA molido se mezcló mecánicamente en porcentajes de 20%, 50% y 75% en peso con cuatro

AN. Tres de los materiales eran procesados mecánicamente y satisfacen las especificaciones en capas de base triturada, mientras que el cuarto es un material de grava natural.

Las distribuciones del tamaño de los materiales sin mezclar demostraron que fueron bien calificados. El ARA muestra una curva bien graduada con un 96% al pasar por el tamiz de 1½ pulgada (3,81 cm) y 1% de finos. Para los cuatros áridos probados, la adición de ARA a los materiales naturales resultó en un aumento en la cantidad de partículas que pasan el tamiz de mayor abertura y una disminución en el porcentaje de partículas que pasan el tamiz de menor abertura. La reducción de las partículas más pequeñas se cree que es debido a la adhesión con el asfalto y el proceso de molienda utilizado para producir el material de ARA.

Los resultados de los ensayos de corte directo realizados sobre las mezclas de AN y ARA para capa de base, indicaron que con un esfuerzo normal dado, la resistencia al corte del suelo disminuyó a medida que la cantidad de ARA en una muestra aumentaba. Este efecto fue más pronunciado a medida que la tensión normal aumentó. En general, la disminución de la resistencia al corte no era lo suficientemente significativa para la exclusión de ARA como una alternativa de mezcla.

La permeabilidad aumentó con el porcentaje más alto ARA, lo que se atribuyó a la gradación más uniforme del material que ocurre después de la adición de ARA. En general, la conclusión de este estudio fue que el ARA mezclado con árido natural, muestra resultados en las propiedades de ingeniería muy similar a los del material convencional. Se recomienda, sin embargo, que los estudios futuros sobre el desempeño en el campo a largo plazo de las mezclas, son necesarios para determinar la cantidad máxima de ARA permitido en la mezcla.

NIAZI & JALILI [27], realizaron un estudio sobre el cemento Portland, cal hidratada y lechada de cal como aditivos para Cold In-place Recycling (CIR) de pavimento asfáltico. El cemento Portland fue introducido en forma de polvo y la cal se utilizó como cal hidratada en forma de polvo y lechada de cal; se evaluaron los efectos de cada aditivo en las propiedades de las mezclas.

Los resultados mostraron que tanto la cal y cemento Portland pueden aumentar la estabilidad Marshall, módulo elástico, resistencia a la tracción, resistencia a daños por humedad y resistencia a la deformación permanente de mezclas. Los autores no hicieron prueba de la fluencia, y recomendaron el cemento como el aditivo más efectivo.

Capítulo 4

METODOLOGÍA Y ESTUDIO EXPERIMENTAL

Existen una serie de parámetros referentes a los materiales que son indispensables en la construcción de cualquier firme de carreteras. Muchos de estos parámetros se obtienen a partir de ensayos realizados en el laboratorio. Este capítulo presenta los materiales que se utilizaron en la investigación de este estudio y la caracterización de los mismos (árido reciclado de hormigón - ARH-, árido reciclado asfáltico -ARA- y Cemento), también los ensayos correspondientes para conocer los parámetros de mayor importancia en los mismos. De igual manera exponer el procedimiento para la preparación y fabricación de las diferentes muestras, así como los ensayos realizados para conocer el comportamiento mecánico y explicar el fin de cada uno de ellos.

4.1. Materiales Usados.

Para la realización de los diferentes ensayos, se utilizaron materiales que se mantuvieron almacenados y protegidos cuidadosamente; también los trabajos realizados con ellos fueron con estricto control del laboratorio de materiales de construcción de la Universidad Politécnica de Cataluña-UPC.

Los ensayos de caracterización que se realizaron a lo largo de esta campaña experimental son descritos en la *Tabla 4.1*, así como también las normas utilizadas y los materiales que fueron ensayados.

Tabla 4.1: Ensayos de caracterización realizados.

ENSAYOS	NORMAS	MATERIALES
Granulometría	UNE-EN 933-1	ARH y ARA
Densidad, Absorción y Porosidad	UNE-EN 1097-3 UNE-EN 1097-6	ARH y ARA
Densidad Real	UNE 80-103-86	Cemento
Sulfatos Solubles en Ácido y Azufres Totales	UNE-EN-1744-1	ARH y ARA
Identificación visual	UNE-EN 933-11	ARH y ARA
Resistencias Mecánicas	UNE-EN 196-1	Cemento
Granulometría Laser	-----	Cemento
Composición Química: FRX	-----	ARH, ARA y Cemento
Composición Mineralógica DRX	-----	ARH, ARA y Cemento
Contenido de Betún	NLT-164/90	ARA
Índice de Lajas	UNE-EN 933-3	ARH y ARA
Índice de Machacabilidad	UNE 83112-89	ARH y ARA

Con la realización de estos ensayos se pudieron conocer las propiedades físicas y químicas de los dos tipos de áridos, así como también del cemento que se utilizó como material conglomerante de las muestras.

4.1.1. Áridos.

Para la realización de este estudio utilizamos un ARH que no presenta buena textura física y que a simple inspección visual presenta ser un AR de baja calidad. La cantidad de ARH requerido fue obtenido en la empresa Catalana valorizadora de escorias y recicladora de residuos de la construcción y demolición, “ADEC GLOBAL”. El ARA utilizado fue adquirido en la empresa de Asfaltos “PABASFALTO”. En la *Figura 4.1* se observa el ARH y ARA que fueron utilizados en este estudio experimental.



Fig. 4.1: Árido reciclado de hormigón y árido reciclado asfáltico.

4.1.1.1. Granulometría.

El ensayo granulométrico de un árido es la división del mismo en diferentes fracciones, seleccionadas por el tamaño de las partículas que lo componen. Las partículas de cada fracción se caracterizan porque su tamaño se encuentra comprendido entre un valor máximo y un mínimo, en forma correlativa para las diferentes fracciones, de tal modo que el máximo de una fracción es el mínimo de la que le sigue sucesivamente [34]. Por medio de éste podemos conocer los aspectos fundamentales con relación a la granulometría de los áridos: tamaño máximo, tamaño máximo nominal, contenido de finos y la forma de la curva que nos indica la distribución granulométrica del material.

Este ensayo fue realizado en el laboratorio de forma duplicada en cada uno de los áridos, mediante la norma UNE-EN 933-1 y se obtuvieron los resultados descritos en la *Tabla 4.2*; la *Figura 4.2* muestra la gráfica de la distribución granulométrica que se dibuja con porcentajes como ordenadas y tamaños de las partículas como abscisas. Las ordenadas se refieren a porcentaje, en peso, de las partículas menores que el tamaño correspondiente. La forma de la curva da idea inmediata de la distribución granulométrica del árido; un árido constituido por partículas de un solo tamaño estará representado por una línea vertical (pues el 100% de sus partículas, en peso, es de menor tamaño que cualquiera mayor que el árido posea); una curva muy tendida indica gran variedad en tamaños (árido bien graduado) [34]. Es importante conocer esta distribución, ya que influye de forma decisiva en la resistencia mecánica de las capas del firme que contenga dicho árido.

Tabla 4.2: Granulometría del árido reciclado de hormigón y árido reciclado asfáltico.

TAMIZ No.	Material que Pasa (%)	
	ARH	ARA
25	97.3	100.0
20	94.4	100.0
16	89.5	98.5
14	85.8	95.4
10	75.8	83.1
8	67.3	73.3
4	41.9	47.1
2	27.3	27.4
1	16.3	13.7
0.5	9.9	6.8
0.25	6.0	3.1
0.125	3.7	1.5
0.063	2.3	0.8

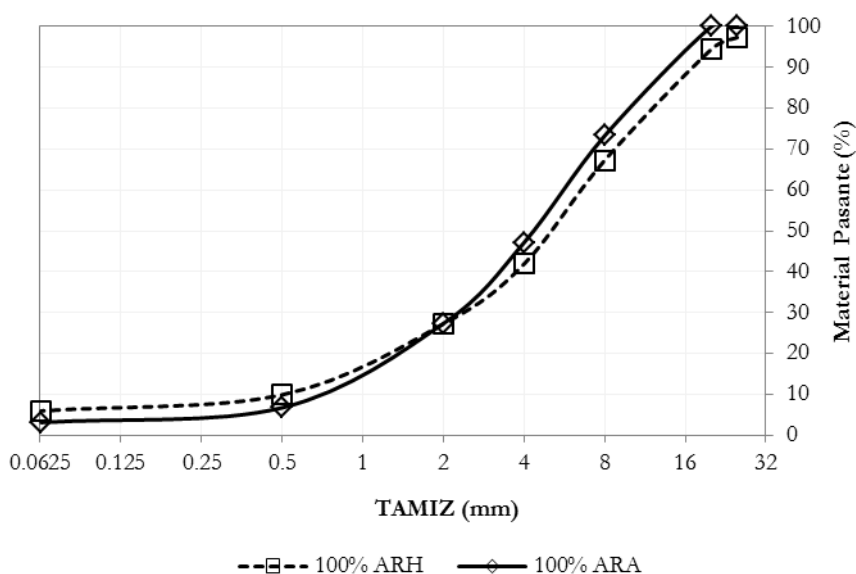


Fig. 4.2: Curva granulométrica del árido reciclado de hormigón y árido reciclado asfáltico.

4.1.1.2. Densidad y Absorción.

La importancia de los materiales que integran cada una de las capas de un firme de carreteras, y el interés de que éstos resistan la acción erosiva como la del agua o los agentes atmosféricos, obligan a caracterizarlos para determinar su porosidad y absorción de agua.

La densidad de los áridos permite conocer los volúmenes compactos del árido, está relacionada con la densidad aparente se puede determinar la compacidad del árido. La absorción está íntimamente relacionada con la porosidad interna de los granos de árido. Conocer estos parámetros en los áridos resulta de mucha importancia, ya que los mismos son influyentes en la calidad el material.

El procedimiento de este ensayo consiste en determinar la masa de una muestra pesándola al aire, en estado seco y en estado saturado superficialmente seco. Luego determinar su volumen

por diferencia entre las pesadas al aire ambiente y sumergido en agua. Conocidas la masa y su volumen se calculan las densidades aparente y seca, así como también la absorción de agua en función de los valores obtenidos para las diferentes condiciones de pesada. El mismo fue realizado en el laboratorio, con las instrucciones de las normas UNE-EN 1097-3 y UNE-EN 1097-6, de los que se obtuvieron los resultados descritos en las *Tabla 4.3*, *Tabla 4.4* y *Tabla 4.5*.

Tabla 4.3: Densidad del árido reciclado de hormigón y asfáltico grueso (4 a 31.50 mm).

TIPO DE DENSIDAD	ARH	ARA
Densidad Aparente (ρ_a)	2.67 Mg/m ³	2.52 Mg/m ³
Densidad Seca (ρ_{rd})	2.28 Mg/m ³	2.41 Mg/m ³
Densidad S. S. D. (ρ_{ssd})	2.43 Mg/m ³	2.45 Mg/m ³

Tabla 4.4: Densidad del árido reciclado de hormigón y asfáltico fino (0.063 a 4 mm).

TIPO DE DENSIDAD	ARH	ARA
Densidad Aparente (ρ_a)	2.60 Mg/m ³	2.45 Mg/m ³
Densidad Seca (ρ_{rd})	2.06 Mg/m ³	2.27 Mg/m ³
Densidad S. S. D. (ρ_{ssd})	2.26 Mg/m ³	2.35 Mg/m ³

Tabla 4.5: Absorción y porosidad del árido reciclado de hormigón y asfáltico.

ENSAYOS	ARH		ARA	
	Grueso	Fino	Grueso	Fino
Absorción (WA_{24})	6.36 %	10.05 %	1.83 %	3.22 %

Los valores de densidad y absorción del ARH y ARA son similares a los valores medios de las muestras ensayadas por el Proyecto GEAR [37].

Como establece la bibliografía el ARH tiene densidad inferior a la del ARA el cual tiene densidad similar a la del árido natural, también que la absorción del ARH es muy superior a la del ARA y los AN. PEREZ et al. [31], en el estudio que realizaron obtuvieron densidad seca del árido natural de 2.80 Mg/m³ y absorción de 0.65%, mientras que el ARH tenía densidad seca de 2.53 Mg/m³ y la absorción de 4.72%; ambos áridos eran del mismo tamaño.

4.1.1.3. Identificación Visual:

La identificación visual, está orientada a describir de una forma técnica, las principales características de diferentes tipos de partículas que contienen los RCD y que interesan a su comportamiento. Las partículas que pueden identificarse a simple vista se denominan partículas gruesas (>4 mm) y las que no pueden ser identificadas a simple vista se denominan partículas finas (< 4 mm).

Este ensayo nos ayuda a determinar los diferentes tipos de materiales que contienen los áridos utilizados en este estudio, el cual se realizó mediante la norma UNE-EN 933-11, en la *Figura 4.3* se muestran los resultados obtenidos en el ARH y ARA.

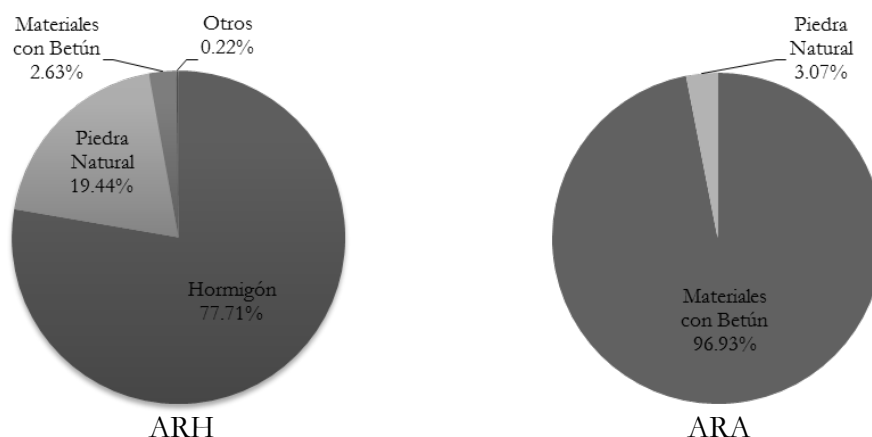


Fig. 4.3: Identificación visual del árido reciclado de hormigón y árido reciclado asfáltico.

4.1.1.4. Sulfatos Solubles en Ácido y Azufres Totales:

Estos son parámetros que se deben tener en cuenta al momento de trabajar con RCD, debido a que pueden contener un alto contenido de sulfatos, ya que el propio contenido del árido natural se le suma los del mortero adherido y la presencia de contaminantes como el yeso en caso de que el hormigón tenga procedencia de edificaciones.

Es importante para la durabilidad de la estructura de una carretera conocer el contenido de sulfatos y azufre de los áridos, ya que de presentar altos contenidos y ser un material tratado con cemento, los aluminatos presentes en el cemento podrían reaccionar con los sulfatos y producir reacciones expansivas como la etringita. Esto comprometería la estabilidad de la base y subbase pudiendo presentar deterioro en la capa de rodadura. Estos ensayos se realizaron en el laboratorio, mediante la norma UNE-EN-1744-1 y se obtuvieron los resultados que se describen en la *Tabla 4.6*, también se muestran los valores máximos exigido por el PG-3 para materiales tratados con cemento.

Tabla 4.6: Resultados sulfatos y azufre totales de los áridos y exigido por el PG-3.

ENSAYOS	ARH	ARA	PG-3
Sulfatos Totales (SO_3)	0.4412 %	0.0274%	0.8000 %
Azufre Totales (S)	0.1208 %	0.0432%	1.0000 %

4.1.1.5. Índice de Lajas:

Las propiedades geométricas de los áridos juegan un papel importante para el funcionamiento en las capas de un firme de carreteras. En este apartado se trata de un ensayo realizado para determinar el índice de lajas en los áridos que son utilizados en construcciones de firmes de carreteras. Los áridos pueden romperse, dando lugar a modificaciones de la granulometría deseada y a una disminución de la capacidad resistente esperada en las capas de un firme.

Este ensayo tiene por objeto calcular el índice de lajas a partir de dos operaciones de tamizado; en primer lugar se divide la muestra en fracciones granulométricas d_i/D_i . Después cada una de las fracciones granulométricas d_i/D_i se criba empleando tamices de barras paralelas y separadas $D/2$. Se define como índice de lajas, la fracción de árido cuya dimensión mínima (grosor) es

menor a 3/5 de la dimensión media de la fracción considerada. Las lajas son partículas con una forma inadecuada, por lo que su contenido tiene limitaciones en la norma de carreteras PG-3.

El índice de lajas fue determinado en el laboratorio, mediante la norma UNE-EN 933-3, el resultado obtenido en cada uno de los áridos se muestra en la *Tabla 4.7*, así como también el valor máximo exigido por el PG-3.

Tabla 4.7: Resultados índice de lajas de los áridos y exigido por el PG-3.

ENSAYO	ARH	ARA	PG-3
Índice de Lajas (IL)	46.89 %	7.59%	35.00 %

4.1.1.6. Índice de Machacabilidad:

El valor de este ensayo, es un indicativo del comportamiento del árido en la resistencia a la compresión; debido que a diferencia del ensayo de Los Ángeles, la compresión es ejercida por la acción de una partícula sobre las contiguas, al ser sometidas a las mismas cargas exteriores aplicada gradualmente, estando éstas en el interior de un recipiente indeformable [45]. De acuerdo con la norma UNE 83112-89, la muestra seleccionada ha de tener tamaños de partícula que pasen por el tamiz de 14 mm y sean retenidas por el tamiz de 10 mm (fracción patrón 10/14) o entre los tamices de abertura 14/20, según sea el caso. En la presente investigación se han considerado las dos fracciones a fin de despejar dudas en cuanto al comportamiento mecánico de los áridos de distintos tamaños.

Este ensayo fue realizado en el laboratorio, apegado a la norma UNE 83112-89, los valores obtenidos en cada uno de los áridos se muestran en la *Tabla 4.8* y el valor máximo establecido por la norma.

Tabla 4.8: Resultados de machacabilidad de los áridos y exigido por la norma.

ENSAYOS	ARH	ARA	NORMA
Machacabilidad (M _{14/20})	37 %	14 %	30 %
Machacabilidad (M _{10/14})	34 %	15 %	30 %

4.1.1.7. Composición Química (FRX):

El ensayo para conocer las diferentes cantidades de óxidos que contienen los áridos se realiza mediante una fluorescencia de rayos X, la *Tabla 4.9* presentan los resultados de las composiciones químicas del ARH y ARA.

Tabla 4.9: Composición química del árido reciclado de hormigón y asfáltico.

COMPUESTOS	CONTENIDOS	
	ARH	ARA
Na ₂ O	0.31 %	1.29 %
MgO	1.41 %	1.39 %
Al ₂ O ₃	4.21 %	6.48 %
SiO ₂	23.65 %	29.57 %
P ₂ O ₅	0.10 %	0.12 %
SO ₃	0.76 %	0.59 %
K ₂ O	0.67 %	1.40 %
CaO	37.10 %	29.85 %
TiO ₂	0.22 %	0.19 %
Fe ₂ O ₃	2.09 %	2.19 %
LOI	29.45 %	26.90 %

4.1.1.8. Composición Mineralógica (DRX):

La composición mineralógica de los áridos que se utilizaron en el estudio se muestra por medio de las Figuras 4.4 y 4.5, el cual a través de los difractogramas se observan las diferentes fases presentes.

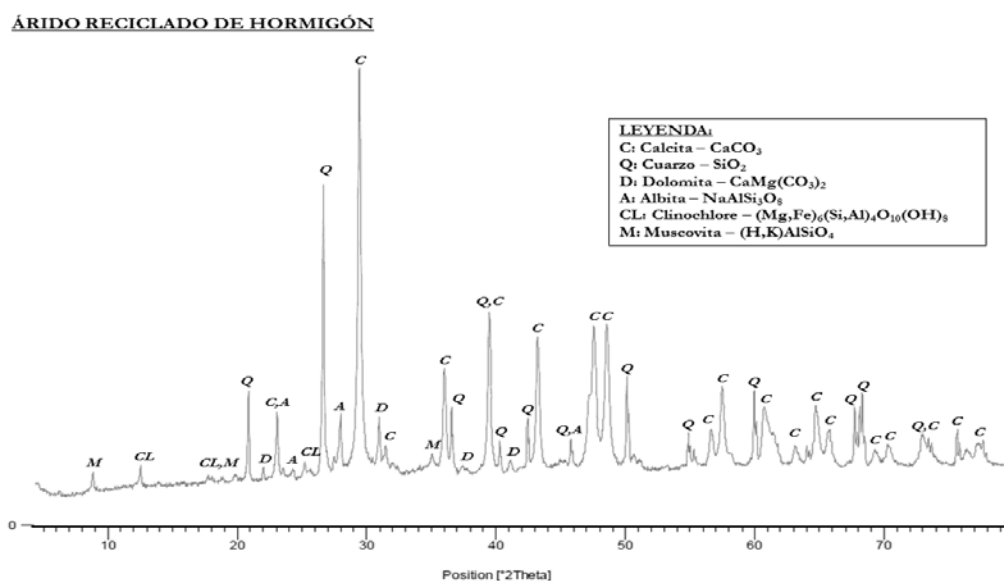


Fig. 4.4: Composición mineralógica del árido reciclado de hormigón.

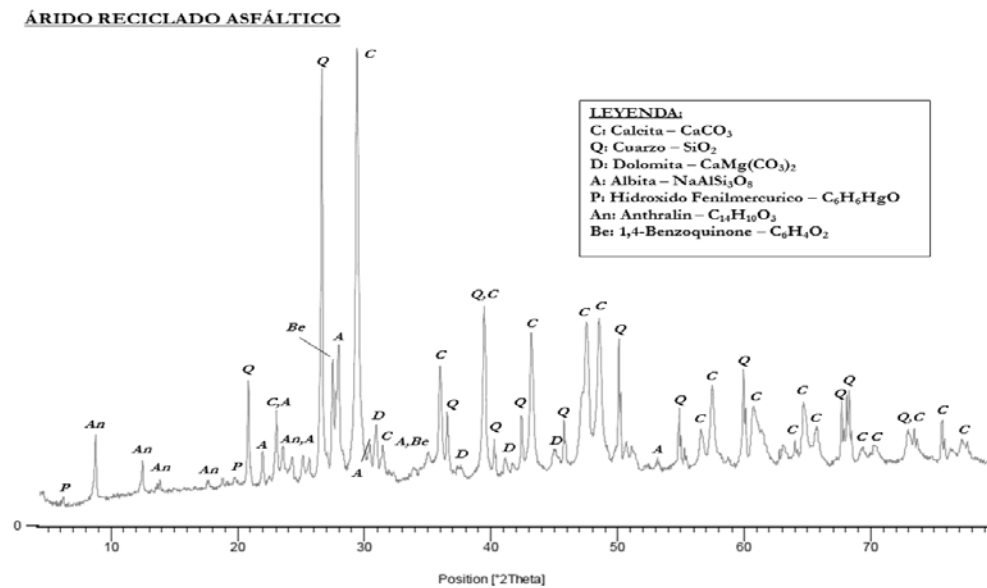


Fig. 4.5: Composición mineralógica del árido reciclado asfáltico.

4.1.1.9. Contenido de Betún:

Para determinar el contenido de betún del material utilizado en este experimento, se realizó el ensayo en el laboratorio tomando en cuenta la norma NLT-164/90, mediante la cual obtuvimos los resultados que mostramos a continuación:

- Betún, s/m = 5.00 % (betún sobre mezcla)
- Betún, s/a = 5.30 % (betún sobre áridos)

4.1.2. Material Conglomerante.

El material conglomerante utilizado en este experimento es Cemento Portland con caliza CEM II/B-L 32,5N, como lo establece el artículo 513 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3). Las características de este cemento son las siguientes:

4.1.2.1. Densidad Real:

El ensayo para determinar la densidad real del cemento se realizó en el laboratorio, mediante la norma UNE 80-103-86 y se obtuvo el siguiente resultado:

- $\rho = 3.01 \text{ Mg/m}^3$

4.1.2.2. Resistencias Mecánicas:

Para determinar las resistencias mecánicas del cemento, se realizaron en el laboratorio los ensayos correspondientes según la norma UNE-EN 196-1 Las características mecánicas (Compresión y Flexión) fueron determinadas sobre probetas de mortero con dimensiones 4x4x16 cm, a una edad de 7 y 28 días de curado en cámara húmeda.

✓ Ensayo a Flexión:

Este ensayo se realizó con 3 muestras, las cuales fueron ensayadas en una prensa Toni Technik de 300 KN de capacidad como se observa en la *Figura 4.6*, y mediante un programa informático se registran los resultados del valor de la resistencia a flexión de cada una de las muestras. Los valores que se obtuvieron con este ensayo son descritos en la *Figura 4.7*.



Fig. 4.6: Ensayo a flexión del cemento.

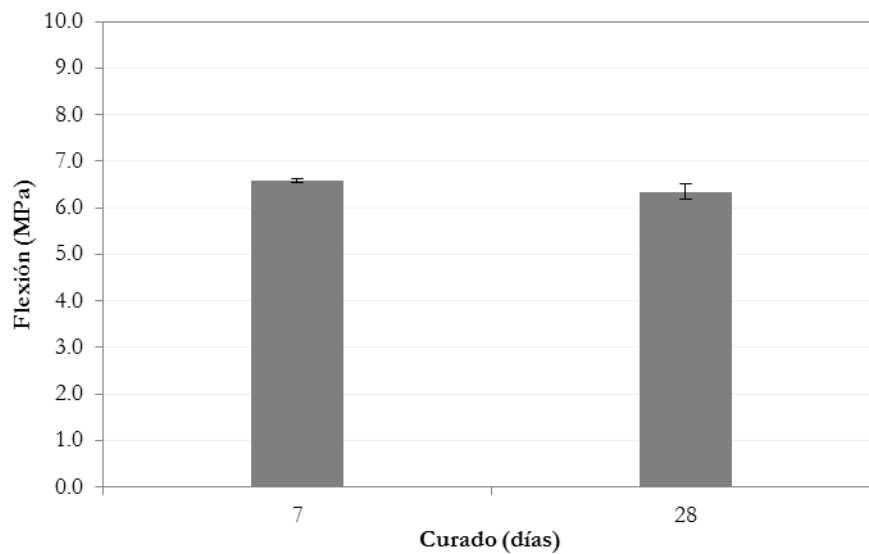


Fig. 4.7: Resistencia a flexión del cemento.

✓ Ensayo a Compresión:

Luego del ensayo a flexión, se obtienen un total de 6 muestras (2 por cada una de las muestras a flexión). Estas muestras se ensayan con el mismo equipo que fueron ensayadas a tracción pero con el dispositivo que se muestra en la *Figura 4.8*. Los valores que se obtuvieron con este ensayo son descritos en la *Figura 4.9*.



Fig. 4.8: Ensayo a compresión del cemento.

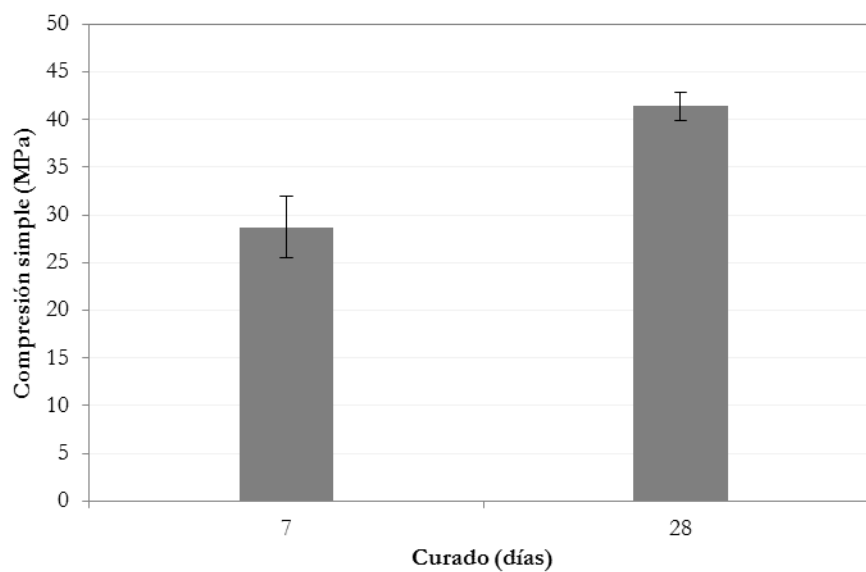


Fig. 4.9: Resistencia a compresión del cemento.

4.1.2.3. Composición Química (FRX):

En la *Tabla 4.10* se presentan los resultados de las composiciones químicas del cemento utilizado para el estudio.

Tabla 4.10: Composición química del cemento.

COMPUESTOS	CONTENIDO
Na ₂ O	0.21%
MgO	1.51%
Al ₂ O ₃	3.12%
SiO ₂	15.07%
P ₂ O ₅	0.12%
SO ₃	3.54%
K ₂ O	0.52%
CaO	61.14%
TiO ₂	0.18%
Fe ₂ O ₃	3.60%
LOI	10.89%

4.1.2.4. Composición Mineralógica (DRX):

En las *Figuras 4.10, 4.11 y 4.12* se pueden observar los resultados de la composición mineralógica del cemento sin hidratar y en pasta con una relación a/c= 0.5 para edades de curados a 7 y 28 días, con el objetivo de ver los compuestos presentes antes y después de hidratar el mismo.

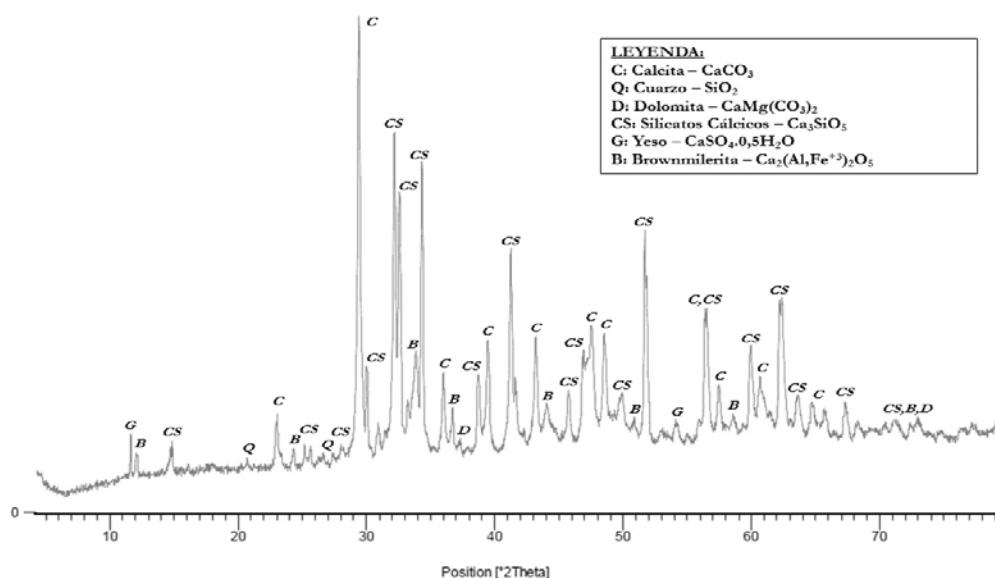


Fig. 4.10: Composición mineralógica del cemento sin hidratar.

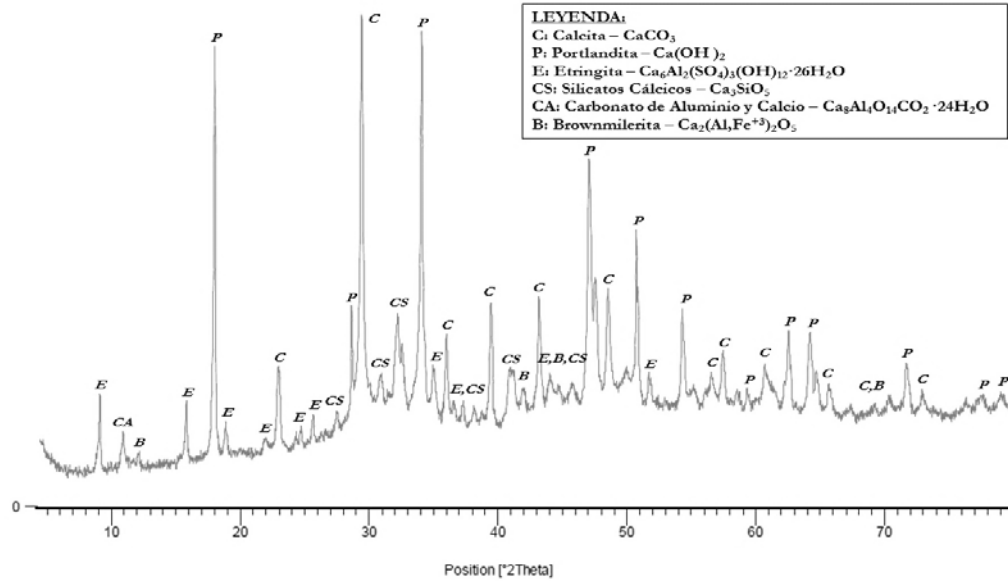


Fig. 4.11: Composición mineralógica del cemento hidratado a 7 días.

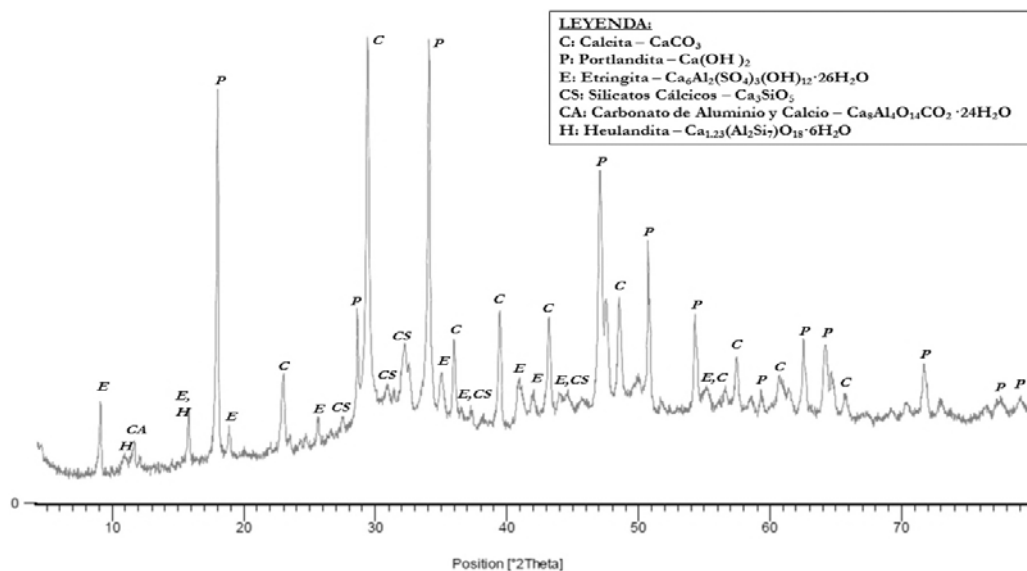


Fig. 4.12: Composición mineralógica del cemento hidratado a 28 días.

4.1.2.5. Granulometría Laser:

Esta técnica de granulometría láser permite determinar distribuciones del tamaño de partícula de una muestra, capaz de medir partículas desde 20 nm a unos pocos milímetros en cuestión de segundos. Este ensayo fue realizado en el Centro Científico y Tecnológico de la Universidad de Barcelona-UB. El tamaño medio de partículas de este cemento es de 18.22 μm . En la Figura 4.13 se observa el resultado de este ensayo en forma gráfica.

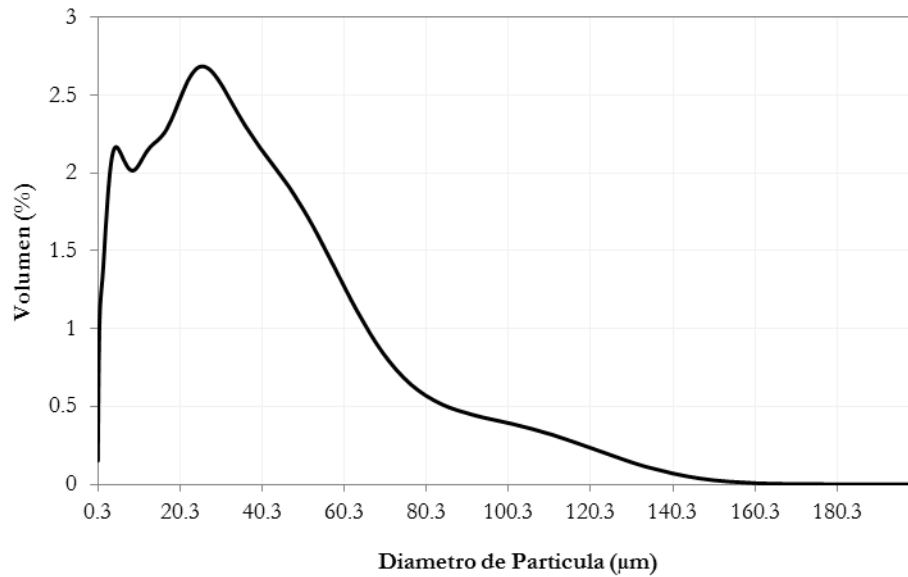


Fig. 4.13: Granulometría laser del cemento.

4.2. Procedimientos y Fabricación.

En este estudio experimental se trabajó con dos tipos de materiales reciclados (ARH y ARA), los cuales fueron combinados sustituyendo distintos porcentajes de ARA por el ARH. En la *Tabla 4.11* se observa las diferentes incorporaciones de áridos en cada una de las muestras, las cuales estabilizadas con cemento les fueron estudiadas algunas propiedades mecánicas.

Tabla 4.11: Diferentes tipos de muestras.

MUESTRAS	ARH	ARA
1	100%	0%
2	90%	10%
3	75%	25%
4	50%	50%

De las probetas realizadas con las distintas muestras, dos de los ensayos fueron con la adición de cemento y las humedades óptimas correspondientes para el caso de Compresión Simple y Módulo Elástico, y otras solo con la humedad óptima en el caso del ensayo CBR. Se realizaron un total de 9 probetas por cada muestra las cuales fueron distribuidas entre los ensayos que comprenden la campaña experimental. La *Tabla 4.12* detalla la distribución de las probetas en cada uno de los ensayos.

Tabla 4.12: Distribución de probetas por muestras realizadas.

TIPO	MUESTRAS	ENSAYOS			TOTAL
		CBR	Compresión	Módulo de Elasticidad	
1	100% ARH+0% ARA	3	3	3	9
2	90% ARH+10% ARA	3	3	3	9
3	75% ARH+25% ARA	3	3	3	9
4	50% ARH+50% ARA	3	3	3	9
TOTAL		12	12	12	36

4.2.1. Fabricación de las Muestras.

Para la fabricación de las probetas, la mezcla de los áridos para obtener los cuatros tipos de muestras utilizados se realizaron bajo el mismo procedimiento, preparando unos 35 kg de cada una de las muestras por ensayo. El procedimiento se describe a continuación:

1. Se tamizó el ARH por el tamiz 20 mm como lo exige la norma para determinar el Índice de CBR (UNE 103-502:1995). Para establecer unas mismas características en las muestras se hizo también para las muestras de los demás ensayos realizados.
2. Se tomó unos 70 kg de ARH del que pasó por el tamiz 20 mm y 35 kg de ARA por cada muestra. Luego se cuarteaba el material como exponen las Figuras 4.14 y 4.15, y se realizaba la mezcla de ambos áridos con los pesos adecuados según la muestra correspondiente como se observa en la Tabla 4.13.



Fig. 4.14: Cuarteo de áridos reciclado para preparación de las muestras.



Fig. 4.15: Cuarteo de áridos reciclado.

Tabla 4.13: Mezclas de áridos para las muestras por ensayo.

TIPO	MUESTRAS	ARH	ARA	TOTAL
1	100% ARH+0% ARA	35,00 Kg	0,00 Kg	35,00 Kg
2	90% ARH+10% ARA	31,50 Kg	3,50 Kg	35,00 Kg
3	75% ARH+25% ARA	26,25 Kg	8,75 Kg	35,00 Kg
4	50% ARH+50% ARA	17,50 Kg	17,50 Kg	35,00 Kg
	TOTAL	110,25 Kg	29,75 Kg	140,00 Kg

3. Se mezclaron los áridos de cada muestra manualmente. En la *Figura 4.16* se pueden observar los áridos antes y después de mezclados, la figura muestra la muestra de 50% ARH+50% ARA.

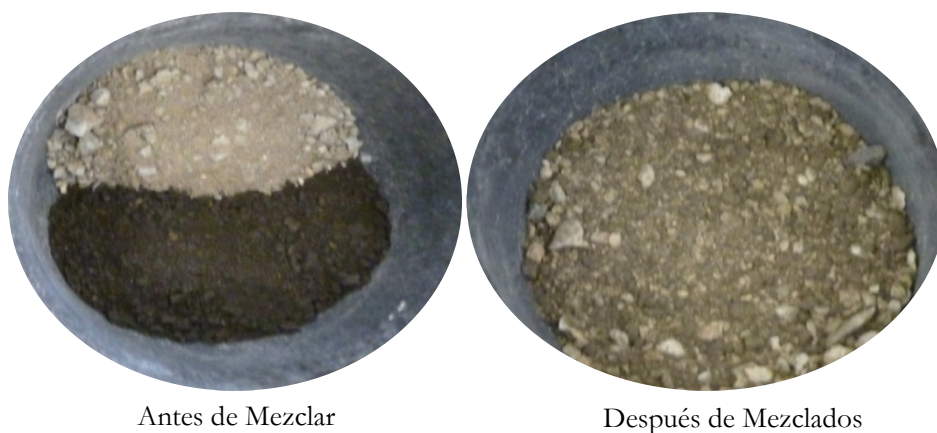


Fig. 4.16: Mezcla de los áridos reciclado.

4.2.1.1. Muestras para Ensayos del Índice de C.B.R.:

El procedimiento para fabricar las muestras para el ensayo de C.B.R. se realizó siguiendo el procedimiento descrito en los apartados 4.1 y 4.3 de la norma UNE 103-502:1995, la preparación de estas muestras a diferencia de las de compresión y módulo de elasticidad no es mezclado con cemento, sino que sólo es los áridos y el agua hasta alcanzar la humedad óptima. La *Figura 4.17* muestra las probetas sumergidas en agua durante 96 horas (4 días).



Fig. 4.17: Probetas CBR sumergidas durante 4 días.

4.2.1.2. Muestras para Ensayos a Compresión:

El procedimiento para fabricar las muestras para el ensayo a compresión se describe a continuación:

1. Luego de estar mezclado el material de cada una de las muestras se tomaba una fracción para determinar la humedad inicial del material en conjunto, siguiendo el procedimiento descrito en la norma UNE 103-300:1993.
2. Se tomaban los 35 kg de cada una de las muestras y se cuarteaba para obtener tres porciones de unos 7 kg cada una.
3. Conocida la humedad inicial de cada una de las muestras se le agrega el cemento correspondiente (% del peso seco) y la cantidad de agua necesaria hasta alcanzar la humedad óptima.
4. Se mezcla manualmente cada una de las muestras de forma que se homogenice el cemento y el agua que se le ha añadido.
5. Luego se introdujo el material en el molde y se compacto mediante tres capas aproximadamente del mismo espesor, de forma que la capa final, después de compactada quede con una altura ligeramente superior a la altura del molde. La compactación de cada una de estas capas se realizó con el martillo vibrante conforme a la norma NLT-310/90.
6. Por ultimo las muestras eran retiradas del molde y colocada en la cámara húmeda como muestra la *Figura 4.18*, para un curado de 7 días como lo exige el PG-3.



Fig. 4.18: Curado de probetas en cámara húmeda.

4.2.1.3. Muestras para Ensayos de Módulo de Elasticidad:

El procedimiento para fabricar las muestras del ensayo de módulo de elasticidad, es el mismo que describimos anteriormente, solo varía el tiempo de curado en cámara húmeda que será por 28 días.

4.3. Propiedades Mecánicas Medidas.

Para dimensionar los firmes de carretera es necesario evaluar el comportamiento mecánico de los materiales tratados con cemento que integran su estructura, por tal razón es importante conocer algunos parámetros fundamentales como son:

- Proctor.
- Capacidad Portante C.B.R.
- Resistencia a la Rotura.
- Módulo de Elasticidad.

A partir de estos parámetros se puede valorar la respuesta de los materiales, ante tensiones y deformaciones bajo una determinada sollicitación, también ante la resistencia al esfuerzo cortante bajo condiciones de densidad y humedad controladas.

Las propiedades mecánicas de los materiales tratados con cemento, no dependen únicamente de las proporciones y características de los materiales que lo componen, sino que también influyen la edad y las condiciones de humedad y temperatura que ha estado sometido durante el fraguado y endurecimiento.

Las características mecánicas que se midieron en este estudio experimental fueron realizadas en el laboratorio y mediante las normas que rigen cada una de ellas. Los ensayos se hicieron por separados debido a que cada uno tiene sus particularidades y norma.

4.3.1. Proctor.

La ejecución de este ensayo resulta de gran interés para la realización de una obra de firmes de carreteras, ya que por medio de éste podemos conocer dos condiciones óptimas muy importantes para la compactación de los áridos, como son: el contenido de agua y la densidad seca máxima.

Aunque el ensayo Proctor Modificado es el utilizado como referencia, se admite también la compactación y determinación de la densidad seca máxima y humedad óptima con martillo vibrante, siguiendo las instrucciones de las normas NLT-310/90 y NLT-311/96. Este ensayo fue realizado en el laboratorio, en la *Figura 4.19* se muestra el equipo de compactación de las probetas con martillo.



Fig. 4.19: Compactación de probeta en ensayo proctor.

Luego de realizar este ensayo en cada una de las muestras, los resultados obtenidos de las densidades seca y humedades se graficaron, y se obtuvo la humedad óptima de cada muestra correspondiente a la mayor densidad seca. En dicha grafica se considera en las abscisas el contenido de humedad y en las ordenadas la densidad seca. A partir de ésta se puede determinar la cantidad de agua de amasado que será utilizado en la compactación del material para obtener la máxima densidad seca para una determinada energía de compactación.

4.3.2. Capacidad Portante C.B.R.

El índice CBR es una medida de la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo, bajo condiciones de densidad y humedad controladas. La finalidad del ensayo CBR (California Bearing Ratio) es determinar la capacidad de soporte del material compactado en laboratorio, con la humedad óptima.

Para este ensayo, se realizaron 12 probetas (3 por cada muestra) como lo muestra la *Tabla 4.12*. La *Figura 4.20* ilustra el montaje de una probeta en la prensa en que se realizó el ensayo, la misma proporciona el resultado en una gráfica mediante la cual y siguiendo los pasos del apartado 5 de la norma UNE 103-502: 1995 se obtiene el índice de CBR de la muestra ensayada.



Fig. 4.20: Probeta en ensayo de CBR.

En general, los AR empleados en obras presentan un índice CBR aceptable. Dichas obras realizadas con AR a los cuales se ha realizado este ensayo (según UNE 103502), cumple con los límites establecidos en el PG-3 [14].

4.3.3. Resistencia a la Rotura.

Los ensayos que comúnmente se realizan para obtener la resistencia a la rotura son los de flexotracción, compresión simple, tracción indirecta y tracción directa, como se observa en la *Figura 4.21*.

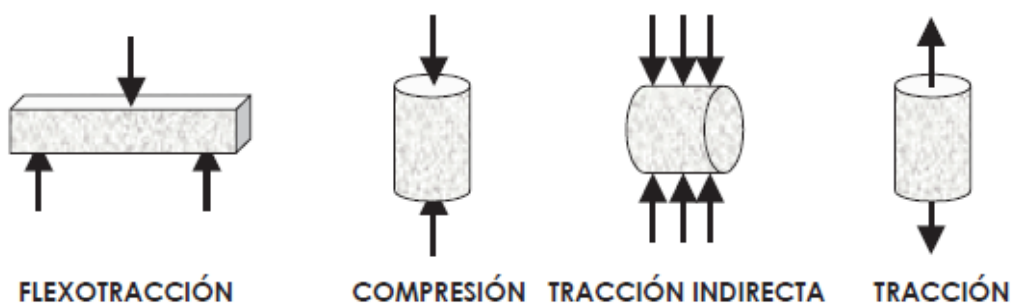


Fig. 4.21: Esquema de diferentes ensayos para caracterizar la resistencia a rotura. Fuente: [12].

El ensayo de flexotracción es el que mejor describe la forma en que trabajan los materiales en los firmes al paso de las cargas de tráfico. Sin embargo, la dificultad de confeccionar probetas prismáticas para ser ensayadas a flexotracción lleva en general a estimar dicha resistencia a partir de resultados de otros tipos de ensayos, y a reservar los de flexotracción, para estudios especiales. El ensayo de rotura a compresión simple es el más utilizado para clasificar los distintos materiales utilizados en los firmes [12].

Este ensayo como se muestra anteriormente en la *Tabla 4.12*, se realizó con un total de 12 probetas (3 por cada muestra). En la *Figura 4.22* se ilustra una probeta sometida al ensayo de compresión simple en una prensa Toni Technik de 300 KN de capacidad. Los resultados se obtienen mediante un programa informático que registra los datos de la resistencia a compresión de la muestra ensayada. Para la rotura de cada una de las muestras se siguieron los pasos establecidos en la norma NLT-305/90.



Fig. 4.22: Probeta en ensayo a compresión.

4.3.4. Módulo de Elasticidad.

El módulo de elasticidad de una capa de firme indica la capacidad de reparto de tensiones, tanto hacia las capas inferiores, como a la explanada.

Este ensayo, al igual que el de compresión se realizó con un total de 12 probetas (3 por cada muestra) como lo muestra la *Tabla 4.12*. En la *Figura 4.23* se ilustra el montaje del ensayo en que se realizó el ensayo y que mediante un programa informático registra los resultados de la resistencia a compresión de la muestra ensayada. Cada una de las muestras se realizó de acuerdo a lo descrito en la norma UNE-EN 13286-43.

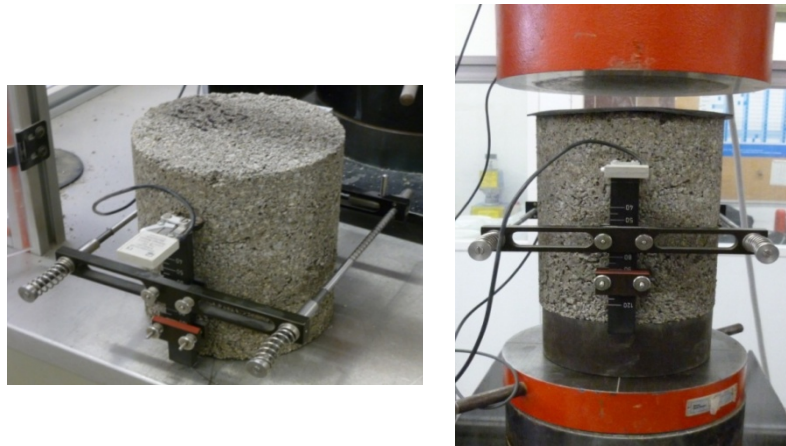


Fig. 4.23: Probetas en ensayo de módulo de elasticidad.

En general, los materiales tratados con cemento presentan un comportamiento elástico intensamente lineal al menos hasta alcanzar un porcentaje importante de su tensión de rotura, y su módulo de elasticidad puede considerarse prácticamente constante en el rango de tensiones dentro del cual suelen trabajar [12].

Capítulo 5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Luego de haber concluido la campaña experimental, se presentan en este capítulo los resultados obtenidos en los diferentes ensayos analizados en el estudio, algunos de los resultados corresponden a la caracterización de los materiales utilizados y otros a las propiedades mecánicas estudiadas. También, se presenta una correlación de las características mecánicas con las diferentes muestras y otras propiedades de los materiales estudiados. Finalmente, añadimos un análisis de dimensionamiento de firme utilizando el método AASHTO con las propiedades mecánicas obtenidas en cada una de las muestras.

5.1. Proctor.

El objetivo de esta fase es determinar en cada una de las muestras el contenido óptimo de humedad y densidad seca máxima para su compactación.

Según el Manual de Capas Tratadas con Cemento [12], en los materiales tratados con cemento el agua tiene dos funciones fundamentales:

- Hidratar el cemento.
- Facilitar la compactación de la mezcla.

El proceso de la hidratación del cemento sólo necesita una pequeña cantidad de agua, del orden del 2%, por lo que la humedad de la mezcla viene determinada por la necesaria para la compactación, que siempre es mayor a la humedad requerida para la hidratación[12].

Como se expuso en el capítulo anterior, el ensayo para determinar la densidad seca máxima y humedad optima, fue realizado en el laboratorio mediante la compactación con martillo vibrante.

En la *Figura 5.1* se exponen las curvas del ensayo Proctor de cada una de las muestras que relaciona la densidad seca y la humedad. Se observa que las muestras que tienen ARA presentan unas curvas más pronunciadas que las de 100% ARH, lo que indican ser más sensibles a los cambios del contenido de humedad. También, puede influenciar que el ARA presenta una densidad seca en las partículas gruesas y fina mayor que el ARH. No obstante las densidades seca máxima y humedades óptimas de cada una de las muestras no presentan prácticamente diferencias, excepto la muestra 75% ARH+25% ARA, el cual tiene una humedad un tanto mayor que las demás. Se puede apreciar que en las curvas existen puntos con densidad y humedad superior a las máximas seleccionadas, pero estas fueron rechazadas por el exceso de humedad que presentado en su estructura lo que afectaría la trabajabilidad en obra.

La diferencia entre la densidad seca máxima y la humedad óptima se debe principalmente a la diferencia entre la densidad y capacidad de absorción de agua de los materiales [39]. Los áridos analizados en este estudio, presentan en particular densidad seca en estufa mayor en la fracción gruesa que en la fina, mientras que la absorción no presenta grandes diferencias entre la fracción gruesa y la fina.

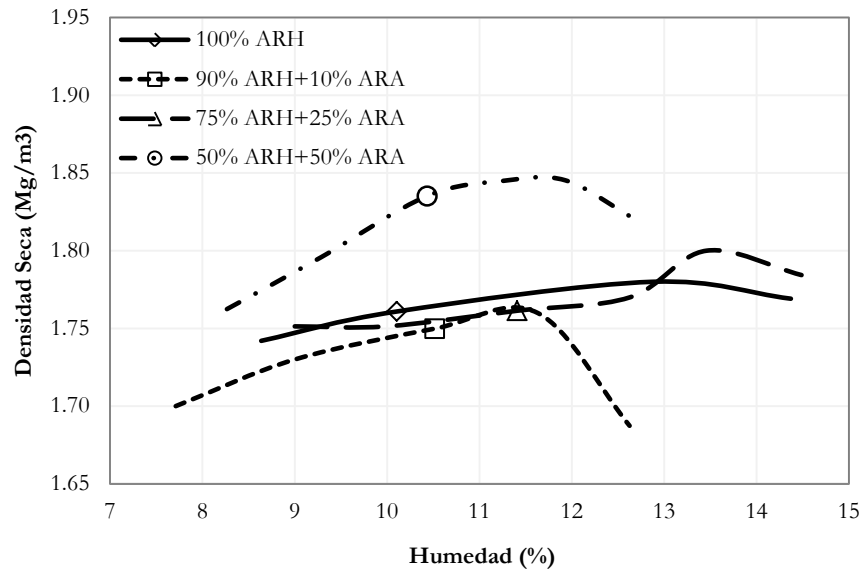


Fig. 5.1: Curvas proctor de cada una de las muestras.

A partir de estas curvas, los resultados obtenidos de las densidades seca y humedades óptimas de cada una de las muestras se detallan en la *Tabla 5.1*, y en la *Figura 5.2* se puede observar las estructuras de cada una de las mezclas con la densidad seca y humedad óptima correspondiente.

Tabla 5.1: Resultados del ensayo proctor en cada muestra.

MUESTRAS	CONTENIDO	
	$W_{\text{óptima}}$	ρ_{seca}
100% ARH+0% ARA	10.10 %	1.76 Mg/m ³
90% ARH+10% ARA	10.50 %	1.75 Mg/m ³
75% ARH+25% ARA	11.40 %	1.76 Mg/m ³
50% ARH+50% ARA	10.40 %	1.84 Mg/m ³

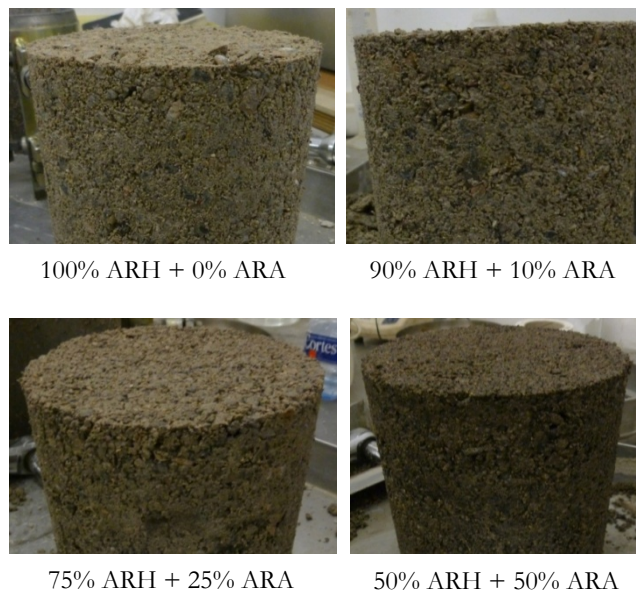


Fig. 5.2: Estructuras de las muestras en el ensayo proctor.

5.2. Capacidad Portante C.B.R.

Las muestras fueron compactadas a la humedad óptima correspondiente, y sometidas al ensayo de California Bearing Ratio (CBR) bajo condiciones de 4 días sumergidas en agua y con una sobrecarga de 4.5 kg.

En la *Figura 5.3*, apreciamos que el ARA presenta un mal comportamiento ante la aplicación de un esfuerzo cortante bajo condiciones de humedad y densidad controlada. Según MARSHALL [23], hay dos problemas que limitan la reutilización del ARA en un campo de base de calzada: relativamente baja resistencia y la tendencia a deslizarse bajo un estrés constante.

El hinchamiento después de 4 días sumergidas en agua fue un valor muy bajo, lo que puede considerarse insignificante para las cuatro muestras ensayadas, lo que garantiza la estabilidad de las capas estructurales.

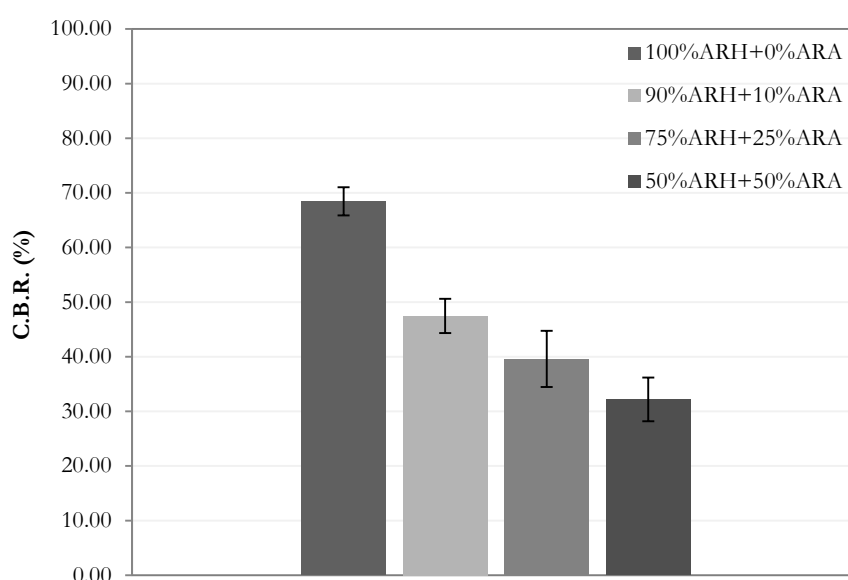


Fig. 5.3: Ensayo de capacidad portante CBR.

En cuanto a los resultados obtenidos en este ensayo experimental, en la *Tabla 5.2* se muestran los valores obtenidos en cada una de las muestras ensayadas como material granular. Con estos resultados alcanzamos uno de los objetivos principales de este estudio, debido a que las mezclas estudiadas sin ligar pueden ser aplicadas en bases y subbases de carreteras.

Tabla 5.2: Resultados del ensayo C.B.R.

MUESTRAS	INDICE C.B.R.
100% ARH+0% ARA	68.45 %
90% ARH+10% ARA	47.46 %
75% ARH+25% ARA	39.61 %
50% ARH+50% ARA	32.19 %

5.3. Dosificación y Caracterización del Material Estabilizado con Cemento.

La dosificación de un material tratado con cemento para una capa de firme tiene como objetivo obtener la combinación óptima de cemento, árido o suelo y agua, que cumpla las especificaciones técnicas fijadas sobre sus características en estado fresco y endurecido. La dosificación debe tener en cuenta además las condiciones de ejecución, especialmente la trabajabilidad, la calidad pretendida y la economía de la obra[12].

Previamente a la dosificación, se comprobó que los materiales que fueron utilizados cumplen con la mayoría de las especificaciones de los Pliegos de Prescripciones Técnicas. Las características que en general deben cumplir los materiales de partida están recogidas en el capítulo anterior de este estudio experimental.

Al momento de dosificar materiales tratados con cemento y que posteriormente serán utilizados en firmes de carreteras, el método más utilizado es el de dosificación por compactación y resistencia. Con el mismo se combinan los componentes de manera que la mezcla cumpla ciertas condiciones físicas (máxima densidad) y logre alcanzar unas determinadas resistencias [12].

A continuación describimos los parámetros tomados en cuenta y el procedimiento de dosificación realizado a cada una de las muestra.

5.3.1. Ajuste de la Composición Granulométrica.

Para la aplicación de los áridos, hay que fijar unos límites inferiores y superiores que dan un entorno dentro del cual se encuentran los tamaños útiles de los áridos para ese huso en específico. El objetivo de la composición granulométrica de los áridos es alcanzar una combinación de las fracciones de áridos disponibles, para que de esta forma la granulometría conjunta se encuentre dentro del huso que el proyecto ha especificado para el material tratado con cemento. Determinar la granulometría de las fracciones de árido, permite luego obtener las proporciones necesarias de cada una para conseguir la granulometría conjunta deseada.

La *Tabla 5.3* presenta los valores de la granulometría del ARH y ARA, y los valores máximos y mínimos exigidos. En la *Figura 5.4* se puede apreciar el huso granulométrico de un suelocemento SC40 del Artículo 513 del PG-3. Se observa que las curvas centradas del huso del suelocemento se ajustan a la línea de máxima y mínima, teniendo en cuenta además que la granulometría no incluye el cemento; la gráfica muestra que cuando las curvas llegan al rango de los finos la curva del ARH se mantiene por encima de la curva del ARA, lo que indica que el porcentaje de finos en el ARH es mayor que en el ARA.

Tabla 5.3: Valores granulométrico del ARH y ARA, y exigido para un SC40 según PG-3 [14].

TAMIZ	% QUE PASA			
	SC40 MAXIMO	SC40 MINIMO	ARH	ARA
25	100.00	67.00	97.33	100.00
20	100.00	62.00	94.44	100.00
8	89.00	45.00	67.30	73.27
4	65.00	30.00	41.90	47.14
2	52.00	17.00	27.26	27.37
0.5	37.00	5.00	9.91	6.75
0.063	20.00	2.00	2.26	0.79

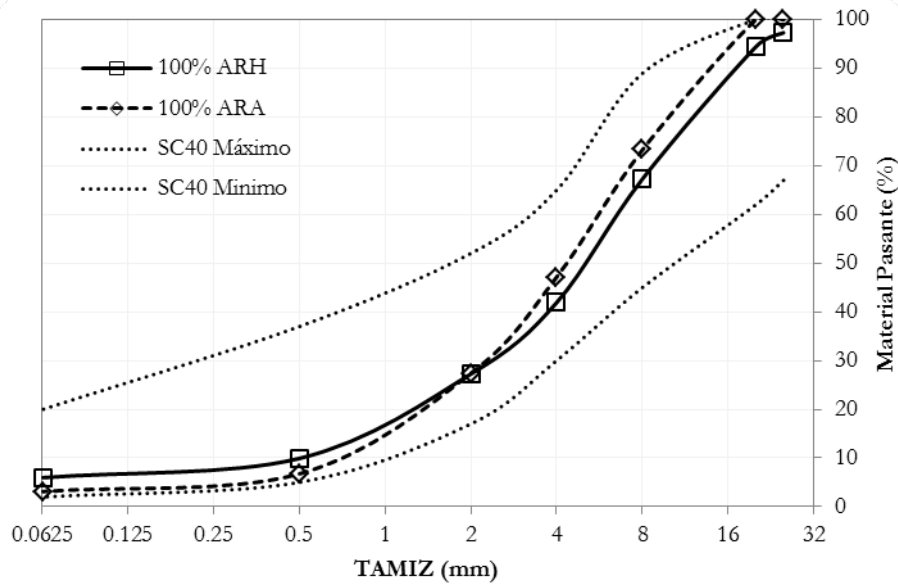


Fig. 5.4: Curvas granulométrica del ARH y ARA, y exigida para un SC40 según PG-3 [14].

Cabe destacar que las diferentes muestras utilizadas en este estudio debido a que eran proporciones de estos materiales se encuentran en los rangos de un SC40 exigido por el PG-3 [14]. La Figura 5.5 muestra las curvas granulométricas de las diferentes muestras, las cuales se obtuvieron de la sumatoria del porcentaje de cada material equivalente a la muestra del porcentaje que pasaba por cada tamiz. Notamos que con los materiales mezclados las curvas en el rango de los finos se presentan con una forma más uniforme y alejada de la curva mínima que exige el PG-3 para un material destinado a un suelocemento SC40.

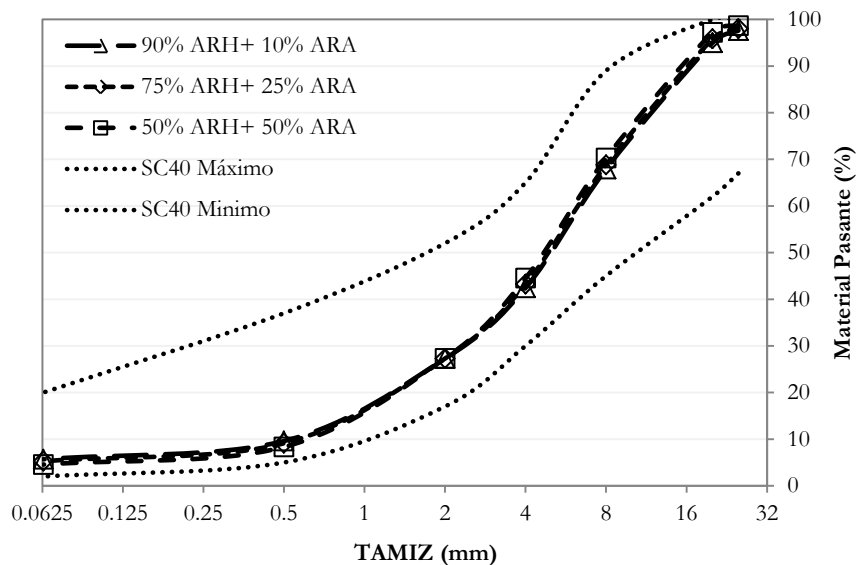


Fig. 5.5: Curvas granulométrica de las muestras de ARH y ARA, y exigida para un SC40 según PG-3 [14].

En el caso de la muestra de 100% ARH, la curva granulométrica es la misma del ARH mostrada en la *Figura 5.4*, por lo que en la figura anterior solo se exponen las curvas de las muestras que tienen la incorporación de ARA.

5.3.2. Dosificación del Conglomerante.

Luego de conocida la humedad óptima de compactación en cada una de las muestras, se realizó la dosificación del conglomerante por medio de ensayos de resistencia a compresión simple. Este ensayo se realizó en el laboratorio, apegados a la norma NLT-305/90 y tomando en cuenta los parámetros establecidos en el artículo 513 del PG-3, donde se establecen las exigencias para un suelocemento. Esta fase tiene a su vez varias etapas, las cuales las describimos a continuación:

5.3.2.1. Preparación y Curado de las Probetas:

Para determinar la resistencia a rotura se realizaron una serie de tres probetas por cada muestra, las cuales se fabricaron y compactaron en el laboratorio con el contenido óptimo de agua de compactación y la máxima densidad seca. Las probetas fueron fabricadas con la densidad seca previamente establecida en cada muestra, el procedimiento utilizado para alcanzar estas densidades fue el descrito en la norma NLT-310/90.

El curado de las probetas se llevó a cabo en cámara húmeda al 95% de humedad constante, durante siete días como lo exige el PG-3.

5.3.2.2. Realización de los Ensayos de Resistencia a Compresión Simple a la Edad Especificada:

El ensayo de compresión simple establecido por la norma NLT-305/90, es el más común en las especificaciones técnicas para la resistencia de rotura, debido a que en cortos períodos de curado (7 días) proporciona resistencias suficientemente elevadas como para caracterizar y comparar los materiales [12].

Las especificaciones españolas exigen valores de resistencia a compresión referidos a probetas con dimensiones de 152.40 mm de diámetro interior y 177.80 mm de altura, ver la *Figura 5.6*. Sin embargo, el mismo puede realizarse con probetas cilíndricas de cualquier relación altura-diámetro siempre que se aplique el coeficiente correspondiente que establece la norma NLT-305/90 como coeficiente de corrección.

El PG-3 [14], en el artículo 513 establece los rango de resistencias mínimas y máximas a 7 días para los materiales tratados con cemento, los cuales se encuentran entre los 2.50 y 4.50 MPa para el caso de un suelocemento. Esos valores mínimos y máximos de resistencia a compresión a corto plazo, son especificados para limitar la incidencia del fenómeno de retracción.



Fig. 5.6: Detalle del molde para las probetas establecidas en el PG-3 [14].

5.3.2.3. Selección del Contenido de Cemento:

Se elegirá un contenido de cemento teniendo en cuenta que debe superar un valor mínimo del 3%, de forma que se garantice un reparto adecuado del cemento en la masa de la mezcla como lo especifica el [14] y no debe ser superior al 7% para garantizar la factibilidad económica del proyecto [1] y [12].

Previamente, se realizaron varios ensayos a compresión. Para cada una de las muestras se hicieron dos probetas de 102 mm de diámetro y 122.40 mm de altura, con dos contenidos de cemento en masa diferentes; un 3.50 y 6% que se encuentran dentro de los valores que establece la literatura para un suelocemento. La *Tabla 5.4* detalla los resultados obtenidos y en la *Figura 5.7* se observa gráficamente la tendencia de la resistencia según el contenido de cemento en cada muestra.

Tabla 5.4: Resultados ensayo a compresión con probetas 102 mm diámetro y 122.40 mm de altura.

MUESTRAS	CEMENTO	
	3.50%	6.00%
100% ARH+0% ARA	1.94 MPa	4.23 MPa
90% ARH+10% ARA	1.88 MPa	3.82 MPa
75% ARH+25% ARA	1.78 MPa	3.07 MPa
50% ARH+50% ARA	1.71 MPa	3.06 MPa

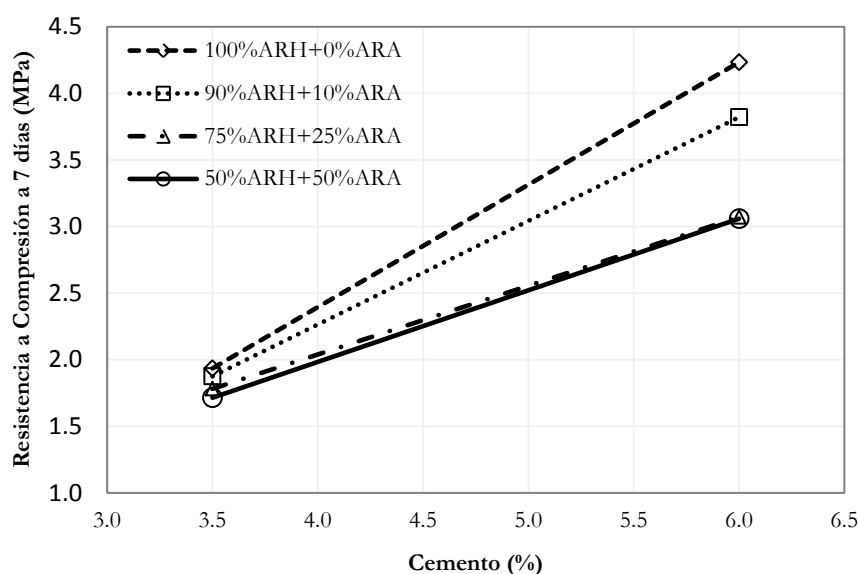


Fig. 5.7: Determinación del contenido óptimo de cemento para un suelocemento.

Luego de estos resultados y visto que con el 6% del cemento cumple con la resistencia exigida por el PG-3 para un suelocemento, decidimos realizar un ensayo a compresión preliminar con las muestras (100%ARH+0%ARA y 50%ARH+50%ARA) debido a que en la figura anterior se muestra que estas son las muestras límites en cuanto a los resultados de la resistencia a compresión, pero esta vez con la probeta de referencia que establece la norma (152.40 mm de diámetro y 177.80 mm de altura), la dosificación utilizadas se detallan en la *Tabla 5.5*.

Tabla 5.5: Dosificación preliminar con probetas 152.40 mm diámetro y 177.80 mm de altura.

MUESTRAS	HUMEDAD INICIAL	CONTENIDO DE CEMENTO		COMPRESIÓN
		W _{inicial} ⁽¹⁾	SECO ⁽²⁾	
100% ARH+0% ARA	7.14%	6.00%	6.46%	2.74 MPa
50% ARH+50% ARA	4.73%	6.00%	6.30%	2.64 MPa

(1) % Cemento en relación al peso del material con humedad inicial.

(2) % Cemento en relación al peso del material seco.

Visto que los resultados del ensayo a compresión preliminar, cumplen con los requisitos del PG-3 para un suelocemento y dado que el contenido de cemento es un por ciento en masa respecto al total del material granular en seco; se decidió a utilizar un 6,50% de contenido de cemento, común para las cuatro mezclas utilizadas en este estudio experimental.

5.4. Resistencia de Compresión Simple.

Los ensayos para determinar la resistencia a compresión simple de cada una de las muestras analizadas en este estudio, ofrecieron los resultados que ilustra la *Figura 5.8*.

Mediante este grafico podemos observar que los resultados obtenidos en el ensayo a compresión simple nos demuestran que la mezcla de ARH con ARA resulta factible en cuanto a

los requisitos establecidos por las normas españolas. Notamos que las muestras que contienen ARA presentan valores mayores que la muestra de 100% ARH, debemos recordar que la calidad del ARH utilizado para este estudio presentaba características de un AR de mala calidad, tal como es el caso de los ensayos de índice de lajas y machacabilidad, en especial el último el cual es un ensayo que nos demuestra el comportamiento de los áridos al momento de ser ensayados a compresión y el ARH nos da un índice de machacabilidad muy superior al del ARA. También, notamos que a medida que aumenta el porcentaje de ARA en las muestras el resultado no presenta diferencias considerables, en especial las muestras que contienen 25 y 50% de ARA.

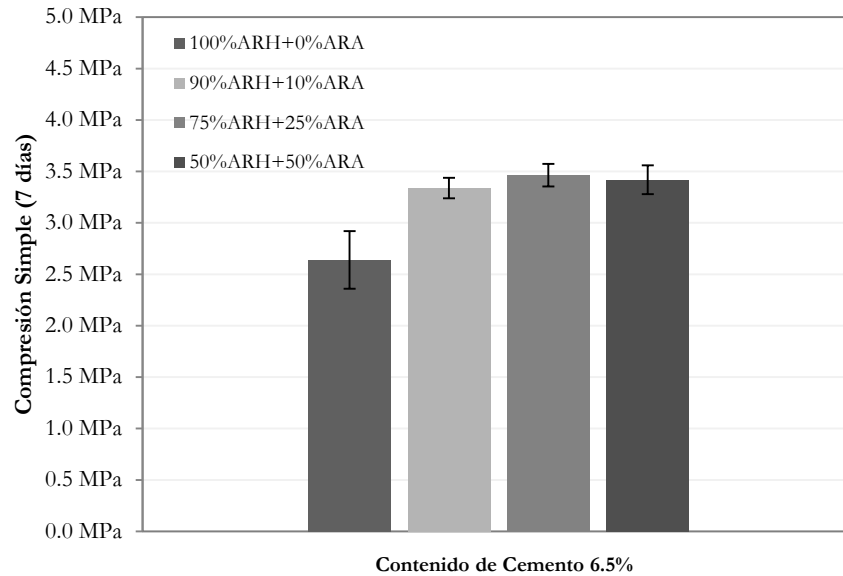


Fig. 5.8: Ensayo a compresión de un suelocemento.

Los valores que nos arrojaron los ensayos son mostrados en la *Tabla 5.6*, los cuales son el valor promedio de los resultados de una serie de tres probetas por cada muestra, se puede observar que en todas las muestras el valor de la resistencia se encuentra dentro de los rangos exigidos por el PG-3 para un suelocemento.

Tabla 5.6: Resultados del ensayo a compresión.

MUESTRAS	RESISTENCIA
100% ARH+0% ARA	2.64 MPa
90% ARH+10% ARA	3.34 MPa
75% ARH+25% ARA	3.46 MPa
50% ARH+50% ARA	3.42 MPa

5.5. Módulo de Elasticidad.

Según SANCHEZ SABOGAL [40], el comportamiento esfuerzo-deformación de los suelos estabilizados con cemento es no lineal y dependiente del esfuerzo. También, establece que para diferentes suelos y niveles de estabilización, y dentro de rangos limitados, se puede asumir que el material es linealmente elástico bajo carga repetida. El mismo corrobora que el módulo suele

variar entre 3500 y 7000 MPa, dependiendo del tipo de suelo, del nivel del tratamiento, del tiempo de curado, del contenido de agua y de las condiciones de ensayo.

En la *Figura 5.9* podemos observar que el máximo módulo de elasticidad es el correspondiente a la muestra sin ARA, lo que se podría decir que influye la presencia del betún que cubre el árido, provocando un aumento en la deformación y en consecuencia un descenso del módulo de elástico. También, hay que considerar la forma de textura que presenta el ARH en las fracciones gruesas, a diferencia del ARA con forma de textura redondeada el cual permite un mayor desplazamiento que induce una mayor deformación y por tanto disminución del módulo elástico.

Hay que toma en cuenta que la muestra 100%ARH contiene una mejor granulometría con mayor contenido de finos, esto nos pone en línea con las investigaciones realizadas por GARNICA et al. [42] cuando establece que la granulometría de los materiales granulares tiene gran influencia en el módulo resiliente que es un estimativo del módulo de elasticidad. En cuanto a las muestras que contienen ARA se observa que la de mayor valor es la del mayor contenido de humedad, lo que probablemente sería el responsable del valor obtenido.

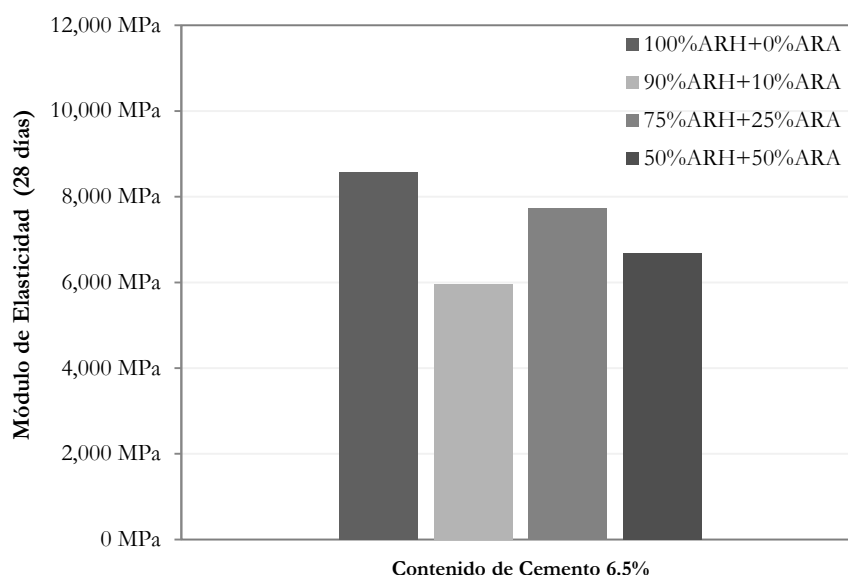


Fig. 5.9: Ensayo de módulo de elasticidad de un suelocemento.

La *Tabla 5.7* se muestran los valores obtenidos en cada una de las muestras en el ensayo de modulo elástico realizado, los cuales se encuentran dentro de los valores que recomiendan RUIZ, et al. [12] para un material tratado con cemento SC40.

Tabla 5.7: Resultados del ensayo de módulo de elasticidad.

MUESTRAS	MODULO DE ELASTICIDAD
100% ARH+0% ARA	8577.00 MPa
90% ARH+10% ARA	5973.00 MPa
75% ARH+25% ARA	7748.00 MPa
50% ARH+50% ARA	6680.00 MPa

5.6. Correlaciones entre Características Mecánicas y Otras Propiedades.

Existen ocasiones en las que resulta importante establecer una correlación entre los resultados de diferentes ensayos, para de esta manera poder determinar características mecánicas razonables de los materiales. Las correlaciones que comúnmente se utilizan son las existentes entre las características que se miden habitualmente en los materiales: resistencia a compresión, densidad seca, contenido de humedad, y otras más difíciles de evaluar mediante ensayos, como la resistencia a flexotracción (que es la que mejor reproduce la forma de trabajo del material en una carretera) o el módulo de elasticidad que es un parámetro fundamental para evaluar su respuesta estructural.

Las correlaciones entre las propiedades mecánicas varían dependiendo el tipo de material tratado con cemento, y por tal razón, se deben tomar únicamente para estimar órdenes de magnitud [12].

5.6.1. Relación entre el Contenido de Humedad y la Composición de la Mezclas Estudiadas.

En la *Figura 5.10* podemos observar la relación entre el contenido de humedad y las diferentes muestras utilizadas en este estudio experimental, podemos observar que con la adición de ARA la humedad aumenta.

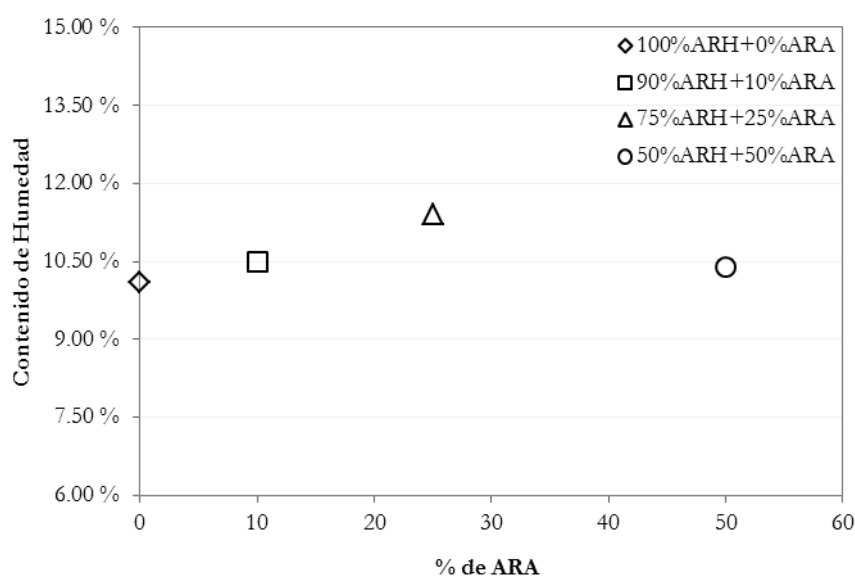


Fig. 5.10: Relación contenido de humedad - diferentes muestras.

5.6.2. Relación entre la Densidad Proctor y la Composición de la Mezclas Estudiadas.

Podemos observar en la *Figura 5.11*, que a medida que aumenta el porcentaje de ARA aumenta la densidad seca de la muestra, por lo que este resultado nos muestra acorde con ALAM et al. [25], quienes en su estudio experimental obtenían mayor densidad seca a medida que aumentaba el contenido de ARA. La influencia de la densidad seca de cada uno de los áridos,

es lo que posiblemente se esté reflejando en el valor de estos resultados, ya que el ARA tiene una densidad seca mayor que el ARH tanto en las partículas gruesas como en las finas.

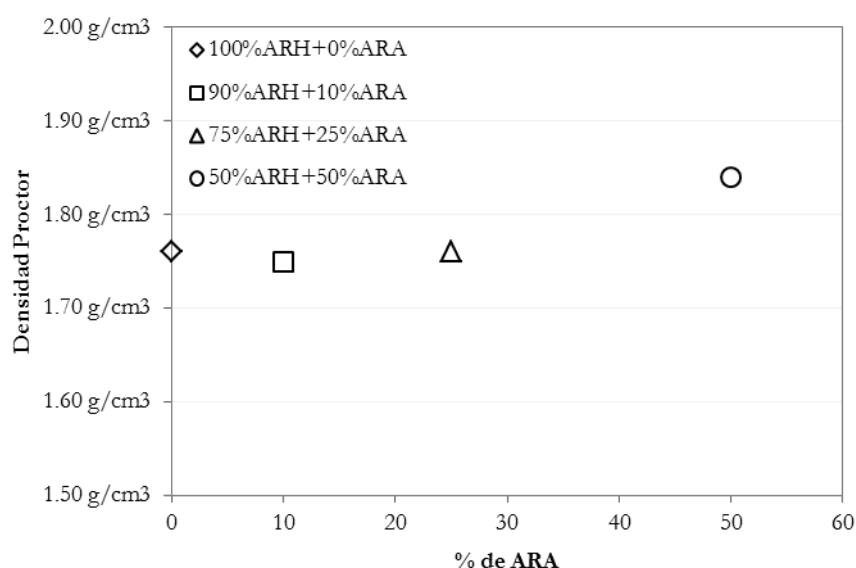


Fig. 5.11: Relación densidad proctor - las diferentes muestras.

5.6.3. Relación entre la Resistencia a la Compresión y Densidad Proctor.

En la *Figura 5.12*, se puede observar la relación entre la resistencia a compresión y la densidad seca máxima de cada una de las muestras ensayada en el estudio, en la misma se muestra que la resistencia a compresión no es lineal a la densidad máxima seca del material, por lo que podríamos decir que en el resultado de la resistencia a la compresión tienen mayor influencia otras características de los materiales como: la humedad, índice de lajas, índice de machacabilidad, entre otras.

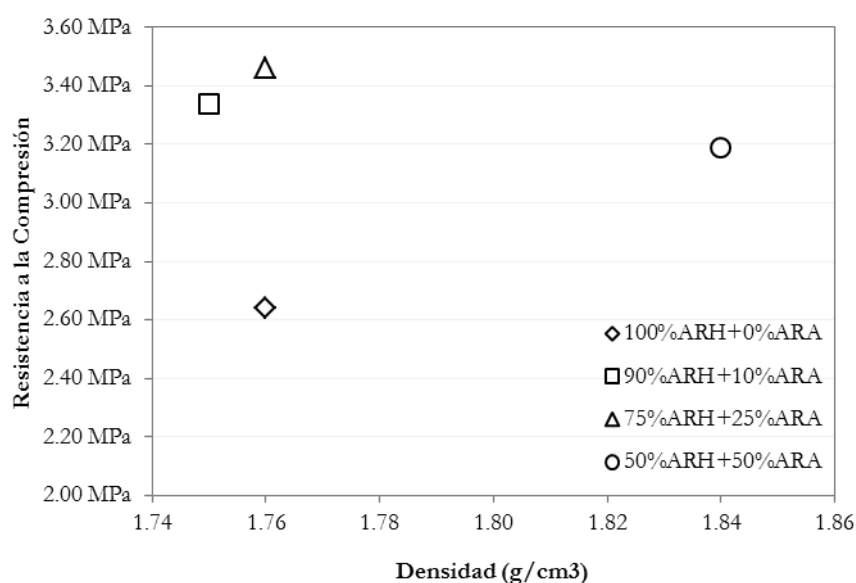


Fig. 5.12: Relación resistencia a la compresión – densidad proctor.

5.6.4. Relación entre el Módulo de Elasticidad y Densidad Proctor.

Como notamos en la figura anterior, en la *Figura 5.13* también podemos observar que el módulo de elasticidad no es lineal a la densidad seca máxima de las muestras, por tal razón se podríamos decir que la densidad seca máxima al igual que para la resistencia a compresión no presenta gran influencia en el resultado del módulo de elasticidad, por lo que los planteamientos expresados anteriormente en este capítulo sobre el módulo de elasticidad coinciden en que su mayor influencia está en el contenido de humedad y la granulometría de los materiales.

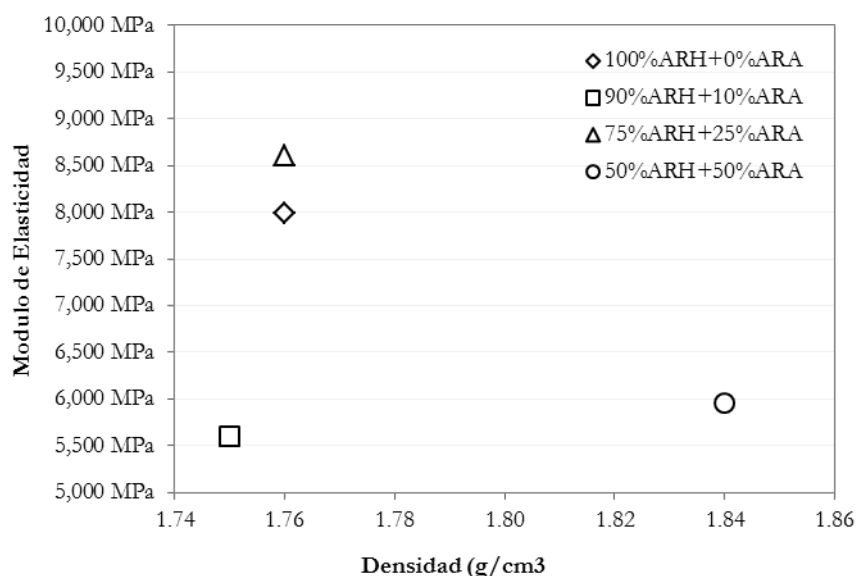


Fig. 5.13: Relación módulo de elasticidad – densidad proctor.

5.7. Dimensionamiento de Firme Utilizando el Método AASHTO-1993.

Con los resultados obtenidos de las propiedades mecánicas medidas en cada una de las muestras, se decidió realizar un dimensionamiento de firmes utilizando el método empírico que según los autores KRAEMER et al. [1], es el método de dimensionamiento que ha logrado mayor difusión. Los resultados del dimensionamiento fueron comparados con los de una categoría de tráfico T2 y para una explanada E1 que establece la norma española 6.1 IC de secciones de firmes [49].

En la *Tabla 5.8* se muestran los requisitos de diseño tomados en consideración para el dimensionamiento, el cual son los mismos para cada una de las muestras estudiadas. Los valores en su gran mayoría son los recomendados por la guía del método AASHTO, el número de ejes equivalente para una T2 fue tomado de la norma 6.1 IC del 1975 y el módulo de resiliencia de la subrasante es resultado de un CBR menor de 7.2, asumiendo una explanada con baja capacidad de soporte E1.

Tabla 5.8: Requisitos de diseño para el dimensionamiento por el método AASTHTO-93.

REQUISITOS	DATOS
Periodo de Diseño	20 años
Numero de Ejes Equivalentes Total (13 t)	2.40E+6
Serviciabilidad Inicial (p_i)	4.20
Serviciabilidad Final (p_f)	2.50
Factor de Confiabilidad (R)	95%
Módulo de Resiliencia de la Carpeta Asfáltica	2758 MPa
Coefficiente Estructural de la Carpeta Asfáltica (a)	0.44
Módulo de Resiliencia de la Subrasante E1	48 MPa

Con los datos de la tabla anterior y las propiedades mecánicas de las muestras dimensionamos el firme. En la Tabla 5.9 se muestra el valor de las diferentes propiedades, así como también el valor de los espesores de la capa asfáltica y la base de suelocemento de la estructura del firme calculada.

Tabla 5.9: Requisitos de diseño para el dimensionamiento por el método AASTHTO-93.

PROPIEDADES DE LAS MUESTRAS	100% ARH	90%ARH +10%ARA	75%ARH+ 25%ARA	50%ARH +50%ARA
Módulo de Elasticidad	8577 MPa	5973 MPa	7748 MPa	6680 MPa
Índice de C.B.R.	68.45	47.46	39.61	32.19
Módulo de Resiliencia de la Base Suelocemento	200 MPa	171 MPa	157 MPa	141 MPa
Coefficiente Estructural de la Base Suelocemento (a)	0.28	0.22	0.26	0.21
Numero Estructural Total (SN_{REQ})	4.35	4.35	4.35	4.35
Numero Estructural Carpeta Asfáltica (SN_{CA})	2.55	2.70	2.79	2.91
Numero Estructural Base Suelocemento (SN_{BSC})	1.80	1.65	1.56	1.44
ESTRUCTURA DEL FIRME CALCULADA				
Espesor Carpeta Asfáltica	15 cm	16 cm	16 cm	17 cm
Espesor Base Suelocemento	18 cm	21 cm	17 cm	19 cm
Espesor Total del Firme	33 cm	37 cm	33 cm	36 cm

Los espesores de las capas del firme calculados fueron comparados con los correspondiente a un tránsito T2 y una explanada de baja calidad de soporte según la norma española 6.1 IC de secciones de firmes, la cual establece que los espesores mínimos para este caso serían 18 cm de carpeta de asfáltica y 30 cm de base de suelocemento. Todos los valores calculados con las diferentes muestras están por debajo de los mínimos exigidos, por lo que trabajarían perfectamente con los espesores mínimos establecidos por la norma española.

Se observa que los dimensionamientos de menor espesor son los de las muestras que tienen un mayor módulo de elasticidad, esto debido a que éste es el determinante del coeficiente estructural el cual es el responsable del espesor de la base suelocemento. También, percibimos que cuando el módulo resiliente de la base disminuye, el espesor de la carpeta de rodadura aumenta, esto debido a que la carpeta tiene el compromiso de asumir mayores tensiones ya que para el mismo tránsito el material de la base soporta menos tensiones, pero de todas forma los espesores tanto de la carpeta asfáltica como el de la base de suelocemento están por debajo de los mínimos que exige la norma española.

CONCLUSIONES

Con el objetivo de conocer el comportamiento de la mezcla de los AR de hormigón y asfáltico realizamos este estudio, y tras finalizar los ensayos experimentales se pudieron obtener las siguientes conclusiones:

- ✓ Las propiedades mecánicas medidas cumplen con los valores exigidos por el PG-3 vigente para un material granular estabilizado con cemento, utilizado como suelocemento SC40. Por lo tanto la mezcla de hasta 50% ARH+50% ARA podría ser empleada como suelocemento de un firme de carretera. Con ello se alcanza el primer objetivo principal de este estudio experimental.
- ✓ Los resultados obtenidos con el 100% de ARH y todas las mezclas estudiadas de este con ARA, especialmente el CBR, demuestran la posibilidad de utilizarlos sin cemento en capas de firme no ligadas, con lo que se cumple el segundo objetivo principal de este trabajo.
- ✓ Las curvas granulométricas de cada uno de los áridos y las muestras estudiadas, se encuentran dentro de las establecidas por el PG-3 vigente para un material granular tratado con cemento SC40.
- ✓ El ARH presenta una densidad seca de 2.17 Mg/m^3 y absorción de 8.20%, mientras que el ARA tiene densidad seca de 2.34 Mg/m^3 y absorción de 2.53%; lo que nos proporciona un ARA de calidad superior al ARH.
- ✓ La densidad Proctor más alta la presenta la muestra con el mayor contenido de ARA, alcanzando los 1.84 Mg/m^3 para una humedad óptima muy similar a las demás muestras analizadas. Las humedades óptimas de las diferentes muestras eran similares, un tanto elevadas debido a que utilizamos un ARH de baja calidad con un alto por ciento de absorción.
- ✓ A pesar de la baja calidad del ARH, el por ciento de cemento utilizado para alcanzar la resistencia a la compresión (6.5%), no sobrepasó el límite del 7% recomendado por algunos autores para un suelocemento.
- ✓ La baja calidad que presenta el ARH, conlleva que a medida que aumenta el por ciento de ARA mejora la resistencia a compresión, lo que podría significar que podemos alcanzar la resistencia exigida por el PG-3 vigente para un suelocemento con un porcentaje menor al 6.5% de cemento.
- ✓ En el caso de aplicar un ARH de muy baja calidad, a priori resultaría antieconómico su aplicación como suelocemento, debido al alto porcentaje de cemento que hay que proporcionarle para alcanzar la resistencia mínima exigida por el PG-3 vigente.
- ✓ El dimensionamiento de firme utilizando el método AASHTO con los resultados mecánicos de las muestras, cumple con los mínimos espesores exigidos por la norma española para las condiciones de tránsito y explanada consideradas en este estudio.

FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Este estudio experimental abrió nuevas ideas y oportunidades para realizar trabajos futuros respecto a la mezcla de estos dos AR, dentro de las futuras líneas a investigar que proponemos se pueden citar las siguientes:

- ✓ Realizar un estudio experimental con la mezcla de ARH de buena calidad y el ARA, para determinar las propiedades mecánicas y ser empleadas en la capas de firme de carreteras.
- ✓ Determinar el mayor porcentaje de ARA, que mezclado con ARH y estabilizado con cemento sea factible al cumplimiento de las exigencias del PG-3 para ser utilizados en bases y subbases de carreteras.
- ✓ Realizar los ensayos del Módulo Resiliente y el Modulo de Compresibilidad, ya que estos parámetros son muy importantes conocerlos al momento de dimensionar un firme de carreteras.
- ✓ Estudiar más fuentes de ARA para determinar otras propiedades, y de esta forma obtener una conclusión general sobre el uso de ARA en las capas bases y subbases de carreteras.

REFERENCIAS

- [1] KRAEMER, C.; PARDILLO, J. M^a. et al. (2004). *Ingeniería de Carreteras*. (Vol. II, págs. 233-283). Madrid, España: McGraw-Hill/Interamericana de España, S. A. U.
- [2] SANCHES DE JUAN, M. & ALAEJOS, P. (2006). *Estudio Sobre la Propiedades del Árido Reciclado. Utilización de Hormigón Estructural*. Ministerio de FomentoEspañol.
- [3] SANCHES DE JUAN, M. (2004). *Estudio Sobre la Utilización de Árido Reciclado para la Fabricación de Hormigón Estructural*. Madrid, España: Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- [4] FERÁNDEZ CÁNOVAS, M. (2011). *Hormigón*. (Novena Edición ed., págs. 17-100) Madrid, España: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- [5] RC-08 (2009). *Instrucción para la Recepción de Cementos*. Madrid, España: Ministerio de Fomento.
- [6] SANCHES DE GUZMAN, D. (1987). *Tecnología del Concreto y del Mortero*. (Págs. 29-68). Bogotá, Colombia: Facultad de Ingeniería-Universidad Javeriana.
- [7] BYE, G. (1999). *Portland Cement*. (Segunda Edición ed.). Londres, Gran Bretaña: Pergamon Press Ltd.
- [8] NEVILLE, A. (1988). *Tecnología del Concreto*. (Vol. I). D.F., México: Editorial Limusa, S.A.
- [9] NEVILLE, A. & BROOKS, J. (2010). *Concrete Technology*. (Segunda Edición ed.). Londres, Gran Bretaña: Prentice Hall.
- [10] ORCHARD, D. F. (1979). *Concrete Technology*. (Cuarta Edición ed., Vol. I). Londres, Gran Bretaña: Aple science publishers LTD. Ripple road, Barking, Essex, England.
- [11] SERRANO, J. (2011). *Especialidad Gestión del Tráfico y Movilidad*. (Tema 6). Madrid, España: Dirección General de Tráfico.
- [12] RUIZ, A.; JOFRE, C. et al. (1998). *Manual de Capas Tratadas con Cemento*. Madrid, España: Ministerio de Fomento.
- [13] JOFRE, C.; KRAEMER, C. & DIAZ MINGUELA, J. (1999). *Manual de Firmes Reciclados in situ con Cemento*. Madrid, España: Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones.
- [14] PG-3 (2008). *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes*. (Artículo 513). Madrid, España: Ministerio de Fomento.
- [15] TERTRE, J. (2007). *Gestión de Residuos de Construcción y Demoliciones*. (Informes de la Construcción. Vol. 59,506, págs. 131-132). España: Seminarios Torroja.
- [16] JIMENEZ, J. R.; AGRELA, F. et al. (2011). *A Comparative Study of Recycled Aggregates from Concrete and Mixed debris as Material for Unbound Road Sub-base*. *Materiales de Construcción*. (Vol. 61, 302, 289-302) doi: 10.3989/mc.2010.54009.
- [17] AGRELA, F.; BARBUDO, A. et al. (2011). *Construction of Road Sections Using Mixed Recycled Aggregates Treated With Cement in Malaga, Spain*. *Resources, Conservation and Recycling* 58 (2012) 98-106. doi:10.1016/j.resconrec.2011.11.003.
- [18] EHE-08 (2008). *Instrucción de Hormigón Estructural*. Madrid, España: Ministerio de Fomento.
- [19] BS 8500-2 (2006). *Concrete Specification for Constituent Materials and Concrete*. Complementary British Standard.

- [20] POON, C. S.; SHUI, Z. H. et al. (2004). *Influence of Moisture States of Natural and Recycled Aggregates on the Slump and Compressive Strength of Concrete*. Cement and Concrete Research; 1:31-6.
- [21] TOPCU, I. B. & SENDEL, S. (2004). *Properties of Concretes Produced with Waste Concrete Aggregate*. Cement and Concrete Research; 34(8): 1307-12.
- [22] SANCHEZ DE JUAN, M. & ALAEJOS, P. (2004). *Influencia de la Calidad del Reciclado Total en las Propiedades del Hormigón*. En: Conferencia RILEM Internacional sobre el Uso de la Utilización de Materiales Reciclados en los Edificios y Estructuras. pp. 8-11.
- [23] MARSHALL BLEAKLEY, A. (2012). *Improving the Properties of Reclaimed Asphalt Pavement for Roadway Base Applications through Blending and Chemical Stabilization*. Melbourne, Florida: Tesis Doctoral. Facultad de Ingeniería de la Instituto de Tecnología de Florida.
- [24] FOYE, K. C. (2011). *Use of Reclaimed Asphalt Pavement in Conjunction with Ground Improvement: A Case History*. Advances in Civil Engineering, vol. 2011, article number 808561. doi:10.1155/2011/808561.
- [25] ALAM, T.; ABDELRAHMAN, M. & SCHRAM, S. (2010). *Laboratory Characterisation of Recycled Asphalt Pavement as a Base Layer*. International Journal of Pavement Engineering, vol. 11; no. 2, pp. 123-131.
- [26] MOKWA, R. & PEEBLES, C. (2005). *Evaluation of the Engineering Characteristics of RAP/aggregate blends*. Montana State University, Dept. of Civil Engineering. FHWA/MT-05-008/8117-24.
- [27] NIAZI, Y. & JALILI, M. (2009). *Effect of Portland Cement and Lime Additives on Properties of Cold in Place Recycled Mixtures with Asphalt Emulsion*. Construction & Building Materials 23 (2009): 1338-43. doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.07.020.
- [28] MCGARRAH, E. J. (2007). *Evaluation of Current Practices of Reclaimed Asphalt Pavement/Virgin Aggregate as Base Course Material*. Olympia, Washington. Master of Science Civil Engineering. University of Washington.
- [29] JOFRÉ IBÁÑEZ, C.; RUIZ RUBIO, A. et al. (2003). *Manual de Firmes con Capas Tratadas con Cemento*. Madrid, España: Centro de Publicaciones. Secretaría General Técnica. Ministerio de Fomento.
- [30] ALAEJOS, P. & CALVO, B. (2010). *Construcción Sostenible: Primeras Experiencias en España*. Zaragoza, España: Stylo Digital, SLL.
- [31] PEREZ, P.; AGRELA, F. et al. (2013). *Application of Cement-Treated Recycled Materials in the Construction of a Section of Road in Malaga, Spain*. Construction and Building Materials 44 (2013) 593–599. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.034>.
- [32] EL-MAATY BEHIRY, A. E. A. (2013). *Utilization of Cement Treated Recycled Concrete Aggregates as Base or Subbase Layer in Egypt*. Ain Shams Engineering Journal. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asej.2013.02.005>.
- [33] CEDEX. *Residuos de Construcción y Demolición*. Catálogo de Residuos. Diciembre 2010. Ministerio de Fomento. (En línea, citado el 7 de 03 de 2013). <http://www.cedexmateriales.vsf.es>
- [34] RICO, A. & DEL CASTILLO, H. (1990). *La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres*. Volumen I. D. F., México. Editorial Limusa, S. A.

- [35] PÉREZ JIMÉNEZ, F. et al. (2007). *Proyecto, conservación y Gestión de Firmes*. Madrid, España: Asociación Española de la Carretera Goya.
- [36] AGUADO, A. et al. (2010). *Manual para el Proyecto, Construcción y Gestión de Pavimentos Bicapa de Hormigón*. Barcelona, España: Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones.
- [37] PROYECTO GEAR. (2012). *Guía Española de Áridos Reciclados Procedentes de Residuos de Construcción y Demolición*. Madrid, España. Asociación Española de Gestores de Residuos de Construcción y Demolición.
- [38] CIMENT CATALÁ. *El Cemento Portland*. (En línea, citado el 22 de 02 de 2013). <http://www.ciment-catala.org>
- [39] POON, C. S. & CHAN, D. (2005). *Feasible Use of Recycled Concrete Aggregates and Crushed Clay Brick as Unbound Road Sub-base*. Construction and Building Materials 2006;20:578–85. doi:10.1016/j.conbuildmat.2005.01.045.
- [40] SANCHEZ SABOGAL, F. (2009). *Curso Básico de Diseño de Pavimento*. Modulo 7. (En línea, citado el 22 de 02 de 2013). http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina_via/modulos/
- [41] GARNICA ANGUAS, P. GOMEZ LOPEZ, J. A. et al. (2002). *Mecánica de Materiales para Pavimentos*. Querétaro, Mexico. Secretaría de Comunicaciones y Transportes-Instituto Mexicano del Transporte.
- [42] GERD (2013). *Informe Sobre Gestión y Control de la Producción de los RCD en España periodo 2008–2011*. Asociación Española de Gestores de Residuos de Construcción y Demolición. (En línea, citado el 19 de 05 de 2013). <http://www.gerd.es>
- [43] Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA). *El Cemento*. (En línea, citado el 19 de 05 de 2013) <http://www.ieca.es>
- [44] Oficina de Sostenibilidad Universidad de Sevilla. *Planta de Reciclaje de Residuos*. Documento. (En línea, citado el 22 de 05 de 2013) <http://sostenibilidad.us.es>
- [45] SOSA, I.; THOMAS, C. et al. (2011). *Comportamiento Mecánico de Áridos Reciclados para Hormigón*. (Vol. I). Anales de Mecánica de la Fractura 28.
- [46] Derribos Petralanda. (En línea, citado el 23 de 05 de 2013) <http://www.derribospetralanda.com/servicios.html?id=48>
- [47] COSENTINO, P. (2011). *Improving the Properties of Reclaimed Asphalt Pavement for Roadway Base Applications*. Tallahassee, Florida: Florida Institute of Technology. Department of Civil Engineering.
- [48] SAMPEDRO, A.; AINCHIL, J. P.; VÁZQUEZ, E. et al. (2008). *Diseño y Ejecución de Capas de Suelocemento con RCDs*. VIII Congreso Nacional de Firmes. Valladolid, España.
- [49] NORMA 6.1-IC (2003). *Secciones de Firme, de la Instrucción de Carreteras*. Madrid, España. Ministerio de Fomento.
- [50] HENDRIKS, C. & JANSSEN, G. (2004). *A New Vision on the Building Cycle*. (Págs. 51-66). Holanda. Aenas, Technical Publishers.
- [51] LÓPEZ GAYARRE, F. (2008). *Influencia de la Variación de los Parámetros de DOSificación y Fabricación de Hormigón Reciclado Estructural Sobre sus Propiedades Físicas y Mecánicas*. Gijón, España: Tesis Doctoral. Universidad de Oviedo.